

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

DIPLOMSKI RAD

Marko Katalinić

Zagreb, 2010.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

DIPLOMSKI RAD

OSNIVANJE BRODICE NA NAPUHAVANJE S KRUTIM PROZIRNIM DNOM

Mentori:

Prof.dr.sc. Izvor Grubišić

Marko Katalinić

Doc. dr.sc. Tatjana Haramina

Zagreb, 2010.

Izjavljujem da sam diplomski rad izradio samostalno koristeći se znanjima stečenim tijekom studija i navedenom literaturom.

Zahvaljujem se svojoj obitelji na bezuvjetnoj podršci i ljubavi svih ovih godina, i Karli s kojom su mi usponi i padovi ljepši i lakši.

Zahvaljujem se i svima koji su svojim znanjem, iskustvom i savjetima pomogli pri izradi ovog rada, mentoru prof. dr.sc. Izvoru Grubišiću, i posebno mentorici doc. dr.sc. Tatjani Haramini na ukazanoj pomoći i strpljenju.

Sažetak

Osnovana je brodica na napuhavanje s krutim prozirnim dnom, nosivosti 3 osobe. U skladu s projektnim zahtjevima, i relevantnim propisima kao materijal trupa odabran je prozirni konstrukcijski polimer, poli(metil-metakrilat).

Prema bazi sličnih brodova definirane su glavne izmjere i forma, te je generiran računalni 3D model brodice. Na osnovu modela izračunate su glavne značajke brodice te je izvršena provjera kompatibilnosti s relevantnim propisima Hrvatskog registra brodova.

Numeričkim alatom za mehaniku fluida (CFD) simulirano je strujanje morske vode brzinom od 5 m/s oko trupa brodice fiksnog položaja. Simulacijom je izračunato polje tlaka na dnu, elevacija morske površine oko i iza trupa, te sile uzgona i otpora.

Opisana je izrada i montaža tubusa brodice na napuhavnje s krutim dnom. Sukladno odabranom materijalu (PMMA) definiran je postupak toplinskog oblikovanja dijelova trupa, te je izvršeno laboratorijsko ispitivanje lijepljenih spojeva materijala trupa (PMMA) u kombinaciji s mogućima ljepilima i materijalima za izradu brodice.

Sadržaj

1. UVOD	7
2. OPĆENITO O BRODICAMA NA NAPUHAVANJE	8
2.1. PODJELA BRODICA NA NAPUHAVANJE	8
Ravno sklopivo dno	8
V-trup - kobilica na napuhavanje.....	9
Trupovi visokih performansi.....	9
Brodice na napuhavanje s krutim dnom (RIBs, engl. Rigid-hulled inflatable boats)	10
3. BAZA SLIČNIH BRODOVA	11
4. MATERIJALI	13
4.1. MATERIJAL ZA IZRADU TRUPA.....	13
4.2. OSNOVNA SVOJSTVA POLI(METIL-METAKILATA).....	16
4.3. MATERIJALI ZA IZRADU TUBUSA.....	19
4.4. MATERIJAL ZA IZRADU KRMENOG ZRCALA.....	20
5. PROJEKT BRODICE	21
5.1. 3D - MODEL	21
5.2. NEKE VAŽNIJE ODREDBE REGISTRA	22
5.3. KONSTRUKCIJA TRUPA	25
Dno.....	26
Paluba.....	27
Rebro.....	27
5.4. KONSTRUKCIJA TUBUSA	28
Tubus s ravnim segmentima	28
Zaobljeni tubus.....	29
Tubus D-presjeka.....	29
Tubus sendvič-konstrukcije	30
5.5. ODABIR TUBUSA	31
Broj zračnih komora unutar tubusa.....	31
5.6. KONSTRUKCIJA KRMENOG ZRCALA	32
5.7. OPĆI PLAN	33

6. NUMERIČKA ANALIZA OTPORA.....	35
6.1. PREDPROCESOR.....	36
Učitavanje forme.....	36
Generiranje računske mreže.....	38
Modeliranje slobodne površine.....	40
6.2. PROCESOR.....	40
Odabir fizikalnog modela	40
Kriterij zaustavljenja proračuna	40
6.3. POSTPROCESOR	42
Elevacija morske površine	42
Dijagram sile otpora i uzgona	44
Distribucija tlaka na dnu brodice	45
7. TEHNOLOGIJA	46
7.1. TOPLINSKO OBLIKOVANJE PLASTOMERA.....	46
7.2. IZRADA TUBUSA	49
7.3. MONTAŽA TUBUSA NA TRUP.....	50
Montaža lijepljenjem	50
Montaža tubusa vijcima	52
Klizna montaža tubusa.....	54
Montaža tubusa D-presjeka.....	54
8. ISPITIVANJE LIJEPLJENIH SPOJEVA	56
8.1 NORMA ZA ISPITIVANJE LIJEPLJENOG SPOJA	58
Ispitna epruveta	58
Postupak ispitivanja	59
8.2. REZULTATI ISPITIVANJA.....	60
Pregled prekidnih naprezanja u epruvetama	69
9. EKONOMSKE ZNAČAJKE.....	70
10. ZAKLJUČAK.....	72
11. LITERATURA	73

Popis slika

Slika 1 - Zodiac Futura, brodica na napuhavanje visokih performansi	9
Slika 2 - Usporedba cijene i gustoće prozirnih materijala	14
Slika 3 - Usporedba savojne čvrstoće i modula elastičnosti	15
Slika 4 - Stolić izrađen od akrilnog stakla	16
Slika 5 - Primjer platna za izradu tubusa proizvođača Orca	20
Slika 6 - 3D model brodice - bočni pogled	21
Slika 7 - Računalni 3D model brodice podgled odozdo	22
Slika 8 - Dijelovi trupa.....	25
Slika 9 - Forma dna.....	26
Slika 10 - Žičani model dna	26
Slika 11 - Nacrt palube	27
Slika 12 - Žičani model palube	27
Slika 13 - Rebro	27
Slika 14 - Tubus s ravnim segmentima.....	28
Slika 15 - Zaobljeni tubus	29
Slika 16 - Tubus D-presjeka	29
Slika 17- Tubus sendvič-konstrukcije.....	30
Slika 18 - Raskroj materijla tubusa.....	31
Slika 19 - Krmeno zrcalo	32
Slika 20 - Brodica na napuhavanje s prozirnim dnom, bokocrt i tlocrt	33
Slika 21 - 1/2 brodice učitana u STARCCM+ za analizu otpora.....	36
Slika 22- Domena fluida	37
Slika 23 - Volumni mrežni model od heksaedarskih ćelija	39
Slika 24 - Mreža za simulaciju strujanja koristeći VOF: a) neprikladna, b) prikladna	40
Slika 25- Kriterij zaustavljanja: Rezidualne vrijednosti	41
Slika 26 - Elevacija morske površine, bočni pogled.....	42
Slika 27 - Elevacija morske površine, pogled s krme	42
Slika 28 - Elevacija morske površine, pogled s pramca	43
Slika 29 - Elevacija morske površine, perspektiva	43
Slika 30 - Dijagram sila otpora i uzgona	44

Slika 31 - Distribucija tlaka na dnu brodice.....	45
Slika 32 - Toplinsko oblikovanje: a) podtlakom, b) pritiskom	47
Slika 33 - Toplinsko oblikovanje trupa između 2 kalupa	48
Slika 34 - Izrada tubusa.....	49
Slika 35 - Montaža pregrade zračne komore i ventila	49
Slika 36 - Montaža tubusa lijepljenjem 01	50
Slika 37- Montaža tubusa lijepljenjem 02	50
Slika 38- Montaža tubusa lijepljenjem 03	51
Slika 39- Montaža tubusa lijepljenjem 04	51
Slika 40- Montaža tubusa lijepljenjem 05	52
Slika 41- Montaža tubusa vijcima 01.....	52
Slika 42- Montaža tubusa lijepljenjem 02	53
Slika 43- Montaža tubusa lijepljenjem 03	53
Slika 44- Klizna montaža tubusa	54
Slika 45 - Montaža tubusa D-presjeka 01	54
Slika 46 - Montaža tubusa D-presjeka 02	55
Slika 47 - Montaža tubusa D-presjeka 03	55
Slika 48 - Konfiguracija ispitne epruveta	58
Slika 49 - Dimenzije ispitne epruvete	59
Slika 50 - Kidalica	59
Slika 51 - Usporedba srednjih vrijednosti prekidnih naprezanja u epruветama	69

Popis tablica

Tablica 1 - Rezultati ispitivanja epruveta 1-5, PMMA-PMMA / SikaFlex-295UV	60
Tablica 2 - Rezultati ponovljenog ispitivanja epruveta 1'-5', PMMA-PMMA/SikaFlex-295UV	60
Tablica 3 - Rezultati ispitivanja epruveta 6-10, PMMA-PMMA / Diklormetan	61
Tablica 4 - Rezultati ispitivanja epruveta 11-15, PMMA-PMMA / Loctite SuperAttak.....	62
Tablica 5 - Rezultati ispitivanja epruveta 16-20, PMMA-PMMA / laminirano poliesterskom smolom i staklenim vlaknima	62
Tablica 6 - Rezultati ispitivanja epruveta 21-25, PMMA-PMMA / Collacryl KD	63
Tablica 7 - Rezultati ispitivanja epruveta 26-30, PMMA-DRVO / SikaFlex-295UV	63
Tablica 8 - Rezultati ispitivanja epruveta 31-35, PMMA-DRVO / laminirano poliesterskom smolom i staklenim vlaknima	64
Tablica 9 - Rezultati ispitivanja epruveta 36-40, PMMA-DRVO / Loctite SuperAttak	65
Tablica 10 - Rezultati ispitivanja epruveta 41-45, PMMA-KOMPOZIT / Loctite SuperAttak ...	65
Tablica 11 - Rezultati ispitivanja epruveta 46-50, PMMA-KOMPOZIT /	66
Tablica 12 - Rezultati ponovljenog ispitivanja epruveta 46'-50', PMMA-KOMPOZIT /	66
Tablica 13 - Rezultati ispitivanja epruveta 51-55, PMMA-KOMPOZIT / SikaFlex-295UV	67
Tablica 14 - Rezultati ponovljenog ispitivanja epruveta 51'-55', PMMA-KOMPOZIT / SikaFlex-295UV	67
Tablica 15 - Rezultat ispitivanja epruveta 56-60, PMMA-PMMA / otopina diklormentana i PMMA	68

Popis oznaka i mjernih jedinica fizikalnih veličina

n		nosivost, broj osoba
l	[m]	duljina broda preko svega
l_i	[m]	unutrašnja duljina, duljina kokpita po sredini
m_n	[kg]	masa maksimalnog broja osoba
P_{max}	[kW]	maksimalna snaga motora
$F(d)$		dimenzijski faktor, ovisi o duljini i širini
b	[m]	širina broda preko svega
b_i	[m]	unutrašnja širina broda, širina kokpita
m	[kg]	maksimalna nosivost, uključujući teret, osobe, opremu, motor i gorivo
m_b	[kg]	ukupna masa brodice, uključujući brodicu i svu stalno instaliranu opremu bez motora i goriva
m_{uk1}	[kg]	masa brodice s opremom, bez motora i goriva
m_{uk2}	[kg]	masa brodice s opremom, motorom 10 kW i gorivom, i maksimalnim brojem osoba
V	[m ³]	istisnina svih komora
$V_{T0,26}$	[m ³]	istisnina na gazu 0,26 m od osnovice
Δ_t	[kg]	istisnina tubusa
$\Delta_{t\ 1/2}$	[kg]	istisnina jedne zračne komore
Φ_t	[m]	promjer tubusa
v	[m/s]	brzina brodice / fluida
T_g	[° C]	temperatura staklišta
T_t	[° C]	temperatura taljenja
T_r	[° C]	radna temperatura toplinskog oblikovanja
L	[mm]	preklop ispitne epruvete

1. UVOD

Cilj ovog rada je osnovati pomoćnu pneumatičku brodicu s krutim prozirnim dnom, dimenzija i nosivosti uobičajenih za pomoćne brodice na jahtama u nautičkom sektoru. Ovaj koncept osmišljen je kako bi objedinio dva već postojeća rješenja i time stvorio novi potencijalni segment tržišta u maloj brodogradnji.

Pomoćne brodice moguće je gotovo smatrati nužnima uz jahte oko 10 m dužine i dulje. Nužne su jer nautičarima omogućavaju ukrcaj i iskrcaj u uvalama gdje ne postoji mogućnost sigurnog veza za veću brodicu, ili u lukama gdje ne postoji dovoljno vezova pa se potrebno sidriti ili vezivati se na plutače i putnici nemaju direktan izlaz na obalu. Pošto je jahta negdje usidrena, manjom brodicom je lakše, sigurnije i jeftinije ići su razgledavanje obale, na kupanje ili u ribolov. Najpopularniji tip pomoćnih brodica danas su brodice na napuhavanje (pneumatičke brodice, gumenjaci) zbog boljih svojstava stabiliteta i plovnosti, kao i mogućnosti lakšeg prijevoza i skladištenja u odnosu na klasične brodice. Brodovi s prozirnim dnom za razgledavanje podmorja (engl. glass-bottom boats) potvrđena su turistička atrakcija, međutim najčešće se nude u obliku organiziranih izleta komercijalnim brodicama po određenim rutama.

Rješenje pomoćne brodice na napuhavanje s krutim prozirnim dnom omogućilo bi privatnim vlasnicima jahti dodatnu opciju razgledavanja podmorja u standardnom rješenju pomoćne brodice. Potrebno je naglasiti da se radi o brodici na napuhavanje s krutim dnom jer se brodice na napuhavanje dijele na one koje se cijele napuhuju, one sa sklopivim dnom i one s krutim dnom.

Nudeći nautičarima dodatnu mogućnostu u proizvodu koji im je ionako potreban moguće je pretendirati na dio tržišta.

Također, budući da je odabrani prozirni materijal polimer iz skupine plastomera razmatrana tehnologija izrade, koja je principijelno slična svim plastomerima, može se primijeniti za izradu pomoćnih, i sličnih manjih, brodica od alternativnih materijala u većim serijama, što bi omogućilo ekonomski konkurentniji proizvod.

2. OPĆENITO O BRODICAMA NA NAPUHAVANJE

Prema definiciji Hrvatskog registra brodova i relevante norme **HRN EN ISO 6185-2**^[1], **brodica na napuhavanje** je:

3.1 Plovna struktura (trup), koja postiže cijeli, ili dio oblika i plovnosti medijem za napuhavanje i koja je namijenjena za prijevoz ljudi i/ili tereta na vodi, gdje joj konstrukcija i forma daju svojstvo odolijevanja silama i pomacima koji proizlaze iz stanja mora.

Nadalje, **brodica na napuhavanje s krutim dnom** (engl. Rigid Inflatable Boat, RIB) je:

3.2 Brodica na napuhavanje (3.1) s donjim dijelom trupa konstruiranim kao krutom cjelinom i gornjim dijelom (trup na napuhavanje) koji svoj oblik i plovnost (ili dio njih) postiže medijem za napuhavanje.

U odnosu na klasične brodice istih dimenzija, brodice na napuhavanje imaju veći stabilitet i nosivost, manje su mase i lakše ih je skladištiti i prevoziti. Pogodnosti su posljedica tubusa koji su ispunjeni zrakom pod povišenim pritiskom. Zahvaljujući većem stabilitetu koji tubusi pružaju, amplitude njihanja brodice su zamjetno manje nego kod klasičnih jednotrupaca, osobito manjih dimenzija gdje svaki pomak osobe, tj. težišta mase, uzrokuje neugodno ljuljanje. Manje amplitude ljuljanja pružaju veću sigurnost i udobnost osoba na brodu te olakšavaju ulazak i izlazak kupaca ili ronioča.

Manja masa, također, omogućava lakše premještanje i prijevoz čemu pogoduje i mogućnost ispuhavanja tubusa čime se smanjuju dimenzije. Također, fleksibilnost tubusa i dodatna zaštitna traka na boku umanjuju mogućnost oštećivanja same brodice ili drugog objekta prilikom pristajanja. Radi pogodnosti koje nude, ove brodice su pronašle širok spektar primjene, od malih pomoćnih čamaca od 1.8 metara duljine do radnih brodice (policijskih, ili brodice za traganje i spašavanje) čak i do 18 metara duljine.

2.1. PODJELA BRODICA NA NAPUHAVANJE

Brodice na napuhavanje možemo prema konfiguraciji dna (trupa) podijeliti u 4 kategorije^[2]:

Ravno sklopivo dno

Dno ovih brodice je ravno i nema posebnih pomorstvenih značajki. U gliserskom režimu prilikom skretanja brodice ima tendenciju proklizavanja, a na valovima nema svojstvo prigušenja

vertikalnog gibanja pa brodica neudobno poskakuje. Pod, tj. dno brodice najčešće je izrađeno od PVC (polivinil-klorid) platna u koje su poprečno umetnute drvene letve širine oko 10 cm. Duljina u ovakvoj izvedbi varira od 1.2 do 3 metra. Kod duljih brodica s ravnim dnom dno je uglavnom izrađeno od aluminijskih ili plastičnih ploča koje se zglobno skapaju i potpuno prekrivaju dno. U takvoj varijanti proizvode se do 5 – 6 metara duljine. Unatoč inferiornim svojstvima naspram ostalih izvedbi, ove brodice na napuhavanje našle su primjenu zahvaljujući maloj masi i dimenzijama kada su ispuhane i sklopljene što omogućava jednostavan transport i skladištenje.

V-trup - kobilica na napuhavanje

Konstrukcijom su slične prethodnoj skupini, a razlikuju se po tome što ispod podnica imaju dodatnu komoru uzdužne kobilice na napuhavanje. Napuhavanjem prostora ispod podnica dobijemo fleksibilnu kobilicu, ispunjenu zrakom, srednjeg dubokog V-profila na pramcu. Time se osjetno poboljšavaju performanse brodice. Za vrijeme plovidbe kobilica „reže“ vodu čime se postiže bolja upravljivost i držanje na valovima. Dodatna pogodnost je i povećana istisnina, tj. nosivost u odnosu na prethodnu skupinu. Također, u odnosu na prethodnu skupinu cijena nije mnogo veća, a pruža iste pogodnosti prilikom transporta i skladištenja.

Trupovi visokih performansi

Među brodice na napuhavanje s trupom visokih performansi spadaju pokušaji proizvođača da elementima na napuhavanje imitiraju višetrupce ili SES brodove (engl. Surface Effect Ships, brodovi koji koriste i aerodinamički uzgon), i njihove značajke. Primjer ovakve brodice je model Zodiac Futura prikazan na slici:



Slika 1 - Zodiac Futura, brodice na napuhavanje visokih performansi

Trup ima manje tzv. „brzinske tubuse“ smještene ispod klasičnih tubusa. Kako brodice prijeđe u gliserski režim, izdigne se na ove tubuse potpomognuta aerodinamičkim uzgom zračnog jastuka koji se formira među njima. Ovim ostvari dodatni uzgon koji dodatno izdigne brodicu iz

mora, čime smanji ukupni otpor, a brodica nastavi glisirati na „brzinskim tubusima“ kao trkaći dvotrupac. Ovakve brodice postižu velike brzine, i do 50 čvorova, u kombinaciji s dobrom upravljivošću dvotrupca. Međutim, bolje performanse mogu dati osjećaj lažne sigurnosti te dovesti do nesreće. Zbog male mase i osjetljivosti na položaj težišta sistema posebno je velika opasnost od prevrtanja. Stoga su ove brodice namijenjene iskusnijim korisnicima.

Brodice na napuhavanje s krutim dnom (RIBs, engl. Rigid-hulled inflatable boats)

Glavna značajka ovih brodova je kruti trup izrađen od kompozita ili aluminijski koji je obrubljen tubusima na napuhavanje. Trup je konvencionalnog, dubokog V-oblika na pramcu, koji prema krmu prelazi u ravniji presjek za izglisiranje. Ovaj koncept objedinjuje odlična svojstva stabilnosti i velike rezervne istisnine brodice na napuhavanje s odličnim pomorstvenim performansama klasičnih kompozitnih brodica. Veće brodice u ovoj kategoriji mogu biti opremljene različitim konfiguracijama konzola i sjedala, te ostalih dodatka poput spremišnih prostora (gavuna), tendi za sunce (bimini), spremnika za gorivo itd., tipičnih za kompozitne brodice. Najveći rekreacijski modeli i radne varijante nerijetko imaju i zatvorenu kabinu. Noviji modeli nude mogućnost skidanja tubusa što olakšava skladištenje, održavanje i popravke. U odnosu na klasične brodice RIB brodice nude bolja svojstva stabilnosti i plovnosti, o čemu svjedoči i činjenica da su čest izbor službi za traganje i spašavanje. Neki od primjera primjene ovih brodica su:

- Pomoćne brodice
- Brodice za razonodu
- Ronilačke brodice
- Ribarske brodice
- Vodeni sportovi
- Traganje i spašavanje
- Policijske brodice
- Čamci za spašavanje
- Prijevoz putnika
- Carinske brodice
- Vojne transportne
- Specijalne vojne namijene
- Kontrola ribolova

Manji **gumenjaci s krutim dnom** služe kao ozbiljnije pomoćne brodice za jahte. U odnosu na ostale brodice na napuhavanje odlikuju se boljim svojstvima i većom tržišnom cijenom. Iz tih razloga je u ovom radu za osnivanje odabran upravo ovaj tip brodica.

3. BAZA SLIČNIH BRODOVA

Zodiac Cadet RIB 260

L_{OA}	2,60 m
B_{OA}	1,62 m
Φ_T	0,45 m
Nosivost	3 osobe / 329 kg
P_{max}	6 kW
Projektna kategorija	D
Osovina motora	kratka
Masa	50 kg
v_{max}	19,3 čv



Bombard MAX 2 RIB



L_{OA}	2,20 m
B_{OA}	1,30 m
Masa	30 kg
Nosivost	3 osobe / 329 kg
P_{max}	4 kW
Osovina motora	kratka

Avon Rover 260

L_{OA}	2,60 m
B_{OA}	1,54 m
Masa	38 kg
Nosivost	3 osobe / 420 kg
P_{max}	6 kW
v_{max}	19 čv



Avon Seasport jet 320 SC JC



L_{OA}	3,22 m
B_{OA}	1,70 m
Masa	255 kg
Nosivost	3 +1 osobe / 320 kg
Motor	vodmlazni propulzor
P_{max}	93 kW
v_{max}	45 čv

Lomac, Serie tender, 240 glass

Dno	sklopivo, prozirno
L_{OA}	2,40 m
B_{OA}	1,30 m
Masa	26 kg
Φ_T	0,35 m
Nosivost	4 osobe
P_{max}	5 kW
Broj zračnih komora	2



Lomac, Serie Tender, 270 lx



Dno	kruto, twinshell
L_{OA}	2,73 m
B_{OA}	1,47 m
Masa	47 kg
Φ_T	0,35 m
Nosivost	4 osobe
P_{max}	8 kW
Broj zračnih komora	2

4. MATERIJALI

Brodicu na napuhavanje s krutim dnom moguće je podijeliti na nekoliko konstruktivnih elemenata:

- Trup
- Krmeno zrcalo
- Tubusi
- Oprema

4.1. MATERIJAL ZA IZRADU TRUPA

Materijal trupa treba biti proziran, odgovarati uvjetima eksploatacije i odgovarajućoj normi Hrvatskog registra brodova.

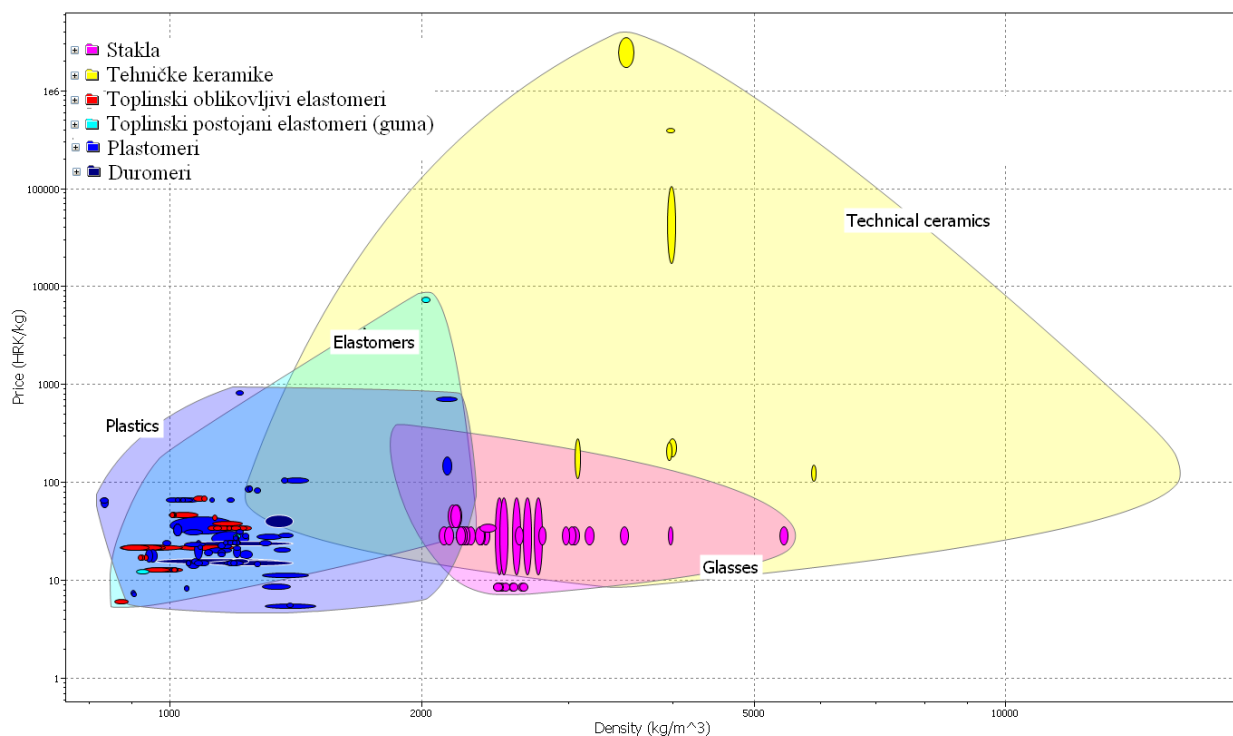
Odabir prozirnog konstrukcijskog materijal za izradu trupa izvršen je uz pomoć računalnog programa CES EduPack 2009 (Cambridge Engineering Selector)^[3]. Ovaj računalni program djeluje kao baza materijala uz mogućnost međusobne usporedbe i eliminacije prema zadanim kriterijima. Ukupno sadrži 2920 vrsta materijala međusobno podijeljenih u 4 osnovne grupe:

- Keramike i stakla;
- Hibridi: kompoziti, pjene, prirodni materijali;
- Metali i legure;
- Polimeri: plastike i elastomeri

Kriteriji odabira materijala trupa:

1. Prozirnost trupa

Kriterij prozirnosti (iznad 90 %), osnovni kriterij po kojem se ova brodica razlikuje od ostalih, eliminirao je većinu materijala iz baze. Materijali koji su zadovoljili pripadaju većinom porodicama stakla i plastomera, dok manji dio otpada na duromere i tehničke keramike.



Slika 2 - Usporedba cijene i gustoće prozirnih materijala

Zamjetno je da stakla i tehničke keramike imaju znatno veću gustoću od polimera (otprilike 2 puta). Pri izradi brodice važno je da su korišteni materijali što lakši, tj. što manje gustoće. Osim toga, stakla su poznata po krutosti, te bi adekvatna varijanta bila samo laminirano staklo. Tehnologija izrade laminiranog stakla je zahtjevnija, a time i skuplja od tehnologije obrade polimera. Što se tiče tehničkih keramika, zbog superiornih mehaničkih svojstava veća gustoća možda i ne bi predstavljala problem, jer bi uštedu mase mogli ostvariti korištenjem tanjih elemenata. Međutim, visoka cijena ovih materijala, kompliciranost obrade i cijena alata obrade eliminiraju ovu skupinu za izradu manjih brodica. Elastomeri su cijenom i gustoćom slični polimerima, ali se bitno razlikuju mehaničkim svojstvima, prvenstveno malim modulom elastičnosti, zbog čega nisu prikladan materijal za izradu trupa.

Skupina plastomera i duromera omogućava najmanju gustoću uz najnižu cijenu. Među plastomerima je ponuđen i relativno širok izbor prozirnih materijala. Kratkim pregledom osnovnih mehaničkih svojstava ustanovljeno je da udovoljavaju uvjetima za izradu brodica, a duromerne smole, u kombinaciji s vlaknastim ojačanjima, uobičajeni su izbor pri izradi manjih brodica.

2. Toplinsko oblikovanje

Daljnja selekcija materijala nastavljena je na osnovi željene tehnologije izrade te je odabran **kriterij toplinske oblikovljivosti**. Time je razmatranje ograničeno na skupinu plastomera.

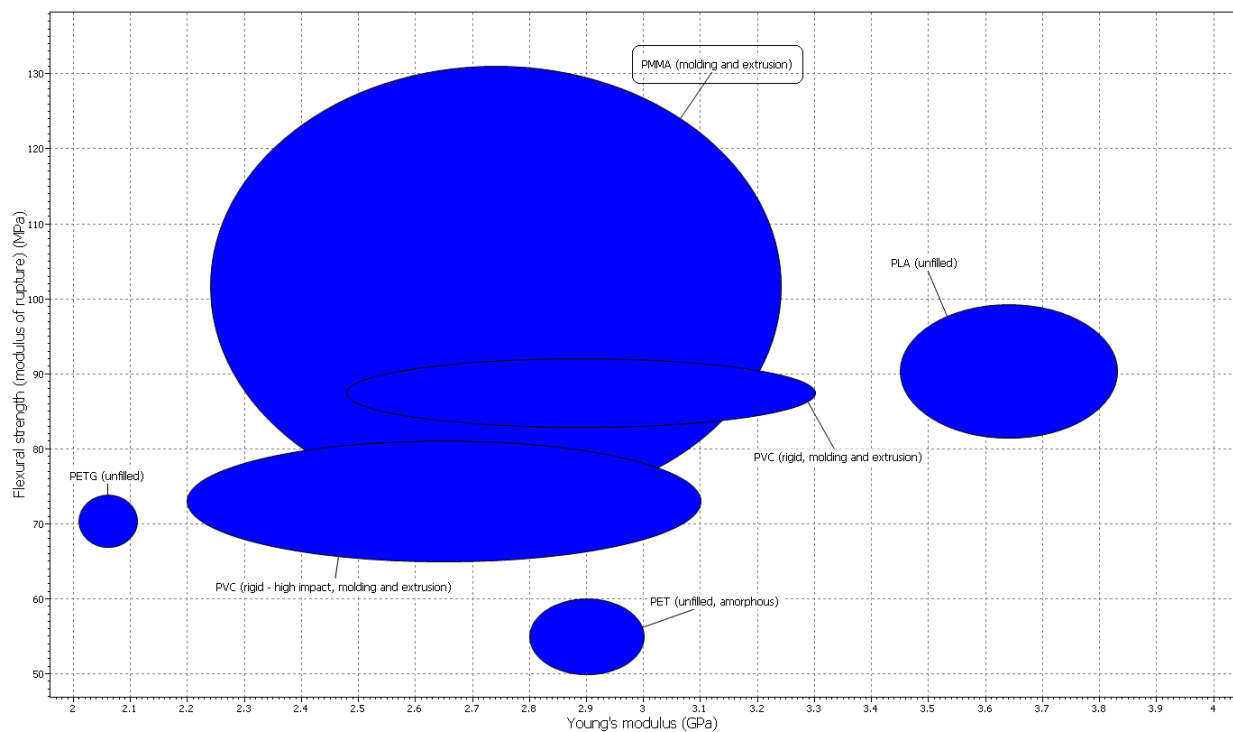
3. Postojanost u morskoj vodi i postojanost na UV zračenje

Jedan od osnovnih uvjeta za upotrebu materijala je **postojanost u okolišu** u kojem će se proizvod koristiti. Upotrebu brodice prvenstveno definira morska voda i dugotrajna izloženost sunčevom zračenju, tj. UV zrakama.

4. Radna temperatura

Radna temperatura materijala propisana prema HRB-u (ISO 6185-2; 4.2.1) mora biti u rasponu od -15°C do 60°C . Za plastomerne materijale to znači da temperatura staklišta (T_g) ne smije biti ispod gornje granice.

Na osnovi gore navedenih kriterija izbor je sužen na 6 materijala koji udovoljavaju svim zahtjevima. Konačni odabir napravljen je usporedbom svojstava savojne čvrstoće i modula elastičnosti, prikazanom u sljedećem dijagramu:



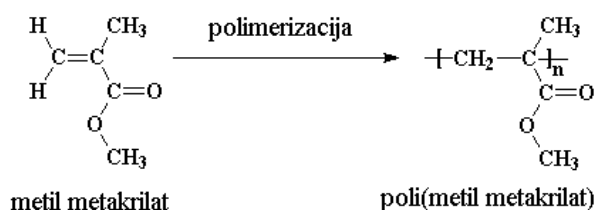
Slika 3 - Usporedba savojne čvrstoće i modula elastičnosti

Kako bi se zadovoljili uvjeti brodograđevnog materijala (čvrstoća, postojanost na vremenske utjecaje i morsko okruženje, cijena), i projektni zahtjev transparentnosti trupa, kao prikladan konstrukcijski materijal trupa odabran je **poli(metil-metakrilat) (PMMA)**.

4.2. OSNOVNA SVOJSTVA POLI(METIL-METAKILATA)

Poli(metil-metakrilat) (PMMA)^[3] amorfni je polimerni materijal iz porodice plastomera, poznatiji kao organsko ili akrilno staklo. Materijal je otkriven 1872. godine, a prvi put komercijalno upotrebljen 1933. godine. Prva važnija primjena bila je za izradu prozora kokpita borbenih aviona tijekom Drugog svjetskog rata. Postojanost u morskoj vodi potvrđuje činjenica da se upotrebljava na prozorima ronilica s ljudskom posadom, te za izradu akvarija i prozirnih stijenki podvodnih hotela.

Kemijski sastav:



Slika 4 - Stolić izrađen od akrilnog stakla

Opća svojstva:

Gustoća	1160 – 1220	kg/m ³
Cijena	13,2 – 18,37	HRK/kg

Mehanička svojstva

Modul elastičnosti (rastezni)	2,24 – 3,8	GPa
Modul smičnosti	0,803 – 1,37	GPa
Modul stlačivosti	4,2 – 4,4	GPa
Poissonov omjer,	0,384 – 0,403	
Granica razvlačenja	53,8 – 72,4	MPa
Vlačna čvrstoća	48,3 – 79,6	MPa
Tlačna čvrstoća	72,4 – 131	MPa
Produljenje	2 – 10	%
Tvrdoća po Vickersu	16,1 – 21,9	HV

Zamorna čvrstoća pri 10^7 ciklusa	15,2 – 32,7	MPa
Lomna žilavost	0,7 – 1,6	MPa m ^{1/2}

Toplinska svojstva

Temperatura staklišta	84,9 - 165	°C
Maksimalna radna temperatura	62	°C
Minimalna radna temperatura	-73,2	°C
Toplinski vodič ili izolator	Dobar izolator	
Toplinska vodljivost	0,0837 – 0,251	W/m K
Specifični toplinski kapacitet	$1,49 \times 10^3 - 1,61 \times 10^3$	J/kg K
Koeficijent toplinskog širenja	72 - 162	μstrain/°C

Električna svojstva

Električni vodič ili izolator	Dobar izolator	
Električni otpor	$3,3 \times 10^{23} - 3 \times 10^{24}$	μohm.cm

Optička svojstva

Transparentnost	Optička prozirnost
Indeks loma	1,49 – 1,56


Tehnologija obrade (1-5)

Lijevanje	3 – 5
Prešanje	4 – 5
Strojna obrada	3 – 4
Zavarivanje	5

Postojanost

U morskoj vodi	Vrlo dobra
Na UV zračenju	Vrlo dobra

Ekološka svojstva

Energija primarne proizvodnje	93,8 – 110	MJ/kg
Emisija CO ₂ pri primarnoj proizvodnji	3,4 – 3,8	kg/kg
Mogućnost recikliranja DA		
Reciklažna oznaka		

Slični materijali su polikarbonat, polistiren i polivinil-klorid.

Smjernice za projektiranje PMMA^[4]

Akril, PMMA, relativno je tvrd i krut u odnosu na ostale polimere, moguće ga je polirati, ali osjetljiv je na koncentracije naprezanja. Moguće ga je laminirati s PVC-om kako bi se povećala žilavost. Kao poluproizvod moguće ga je kupiti u obliku ploča, šipki ili cijevi. Primarni proizvođači oblikuju ga procesima lijevanja i ekstruzije. Lijewane ploče proizvode se tako da se tekući MMA monomer lijeva između dvije ploče temperiranog stakla koje se potom zabrtve te se sustav zagrije kako bi se ubrzala polimerizacija. Moguće je proizvesti prozirne ili obojene panele debljine i do 10 cm. Zbog mogućnosti grešaka na površini ili savijanja staklenih ploča moguće su neravnine na proizvodu ili varijacija u debljini ploče. Postupak ekstruzije je moderniji i omogućava veću dimenzijsku točnost i veću proizvodnost. Rastaljene polimerne granule istiskuju se kroz mlaznicu koja proizvodu daje oblik. Ovim postupkom moguće je proizvesti ploče debljine do 1,2 cm. U materijalu se nakon procesa ekstruzije javljaju zaostala toplinska naprezanja, na što je potrebno paziti ako je kupljena ploča namijenjena daljnjem toplinskom oblikovanju. Prozirne i obojene PMMA ploče moguće je dalje relativno jeftino toplinski oblikovati. PMMA je moguće lijepiti ljepilima na bazi epoksida, alfa-cijanoakrilata, poliestera ili nitril fenola. PMMA je lakše zagrebat i nego staklo, ali moguće ga je djelomično zaštititi odgovarajućim premazima.

Tehničke napomene:

Polimeri su potpuno prozirni kada su amorfne, tj. ne-kristalne, strukture. Amorfnu strukturu uzrokuju ataktički raspoređene velike bočne skupine na osnovnom polimernom lancu, a stabilnost molekula osigurava otpornost na vremenske utjecaje. PMMA nije postojan u dodiru s esterima, ketonima, kiselinama i ugljikovodicima te općenito u otapalima.

Uobičajene primjene:

Svi tipovi leća; prozirni dijelovi kokpita i prozori aviona; zaštitna ograda na terenu za hokej; znakovi; kade; ambalaža; spremnici; kućišta za električnu opremu; crtaći pribor; drške alata; zaštitne naočale; rasvjeta; stražnja svjetla na automobilima; stolice; kontaktne leće; prozori; reklamni znakovi; CD-ovi.

Komercijalna imena:

Acrive, Acrylite, Acryrex, Altuglas, Cyrolite, Diakon, Glasflex, Goldrex, Lucite, Lucryl, Optix, Oroglass, Perspex, Plexiglas, Plexit, Sumiplex.

PMMA u usporedbi s poliesterskim kompozitom ojačanim staklenim vlaknima, koji je uobičajen izbor za izradu trupa RIB brodice, ima lošija mehanička svojstva, te je potrebno koristiti deblje

konstruktivne elemente trupa što rezultira većom težinom brodice. Međutim, brodice na napuhavanje imaju manju masu u odnosu na klasične brodice, i ta margina mase omogućava primjenu PMMA materijala za izradu trupa brodice na napuhavanje s prozirnim dnom prihvatljive mase.

4.3. MATERIJALI ZA IZRADU TUBUSA

Za izradu ostalih konstruktivnih elemenata brodice materijali su odabrani prema uobičajenim i provjerenim rješenjima.

Materijal za izradu tubusa^[2] mora biti fleksibilan, nepropusan za zrak i vodu, otporan na abraziju, te postojan u morskoj vodi i na UV zračenju. Uobičajen odabir je **armirano platno**.

Platno može biti od izrađeno od različitih vrsta plastomera ili elastomera. Nova platna razvijaju se za specifičnu namjenu tako da platno namijenjeno za izradu manje brodice na napuhavanje koja će služiti kao pomoćni čamac, ne mora biti istovjetno onom koje je korišteno za izradu veće RIB brodice. Izradom brodica na napuhavanje bavi se veliki broj malih proizvođača koji često nemaju mogućnosti ili znanja ulagati u razvoj i primijenjivati različite materijale, pa se opredjeljuju samo za jednu vrstu platna. Marketing iza prodaje takvih brodica stvorio je zbrku u percepciji kvalitete različitih vrsta platna zbog čega se može dogoditi da kupac preplati brodicu ili dobije nekvalitetan proizvod.

Platna se razlikuju prema materijalu izrade i gustoći tkanja:

Najrašireniji odabir proizvođača je platno izrađeno na bazi **polivinil-klorida** (PVC) zbog niske cijene, dostupnosti, i mogućnosti strojnog spajanja (zavarivanje plastike) ovog materijala.

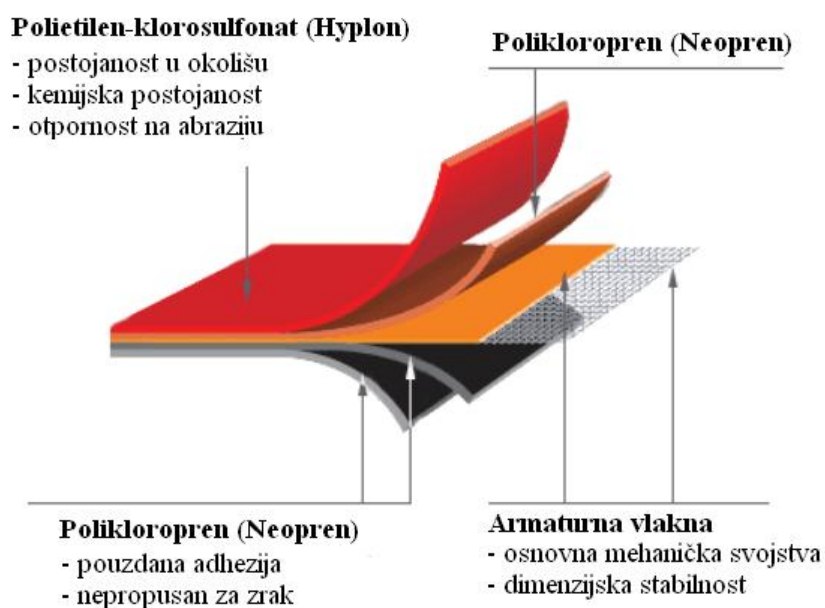
Među značajnije vrste platna spada još i platno na bazi **poliuretana** (PU, PUR) koje je skuplje, ima bolja svojstva od PVC platna, i nudi mogućnost strojnog spajanja tj. automatizacije proizvodnje.

Najkvalitetnijom vrstom platna za izradu tubusa smatra se platno na bazi **sintetskih guma, polietilen-klorosulfonata** (CSPE/CSM, Hypalon) u kombinaciji s **polikloroprenom** (CR, Neopren). Ovaj materijal spada u skupinu elastomera, skuplji je od plastomernih platna (PVC i PU), te odgovara samo manufakturnoj proizvodnji tj. ručnom lijepljenju tubusa.

Platna su armirana najčešće **poliesterskim** ili **poliamidnim vlaknima**. Vlakna platnu daju čvrstoću u smjeru pletenja i dimenzijsku stabilnost. Platna se dijele prema masi upotrebljenih vlakna i gustoći tkanja. Mjerna jedinica za usporedbu vlakana je tex, iako je u upotrebi najčešće decitex^[5] koji predstavlja linearnu gustoću mase vlakna, i definiran je u gramima po 10⁴ m.

Platna za izradu brodica na napuhavanje uglavnom se kreću u vrijednostima između 1000 i 2000 decitexa. Drugo mjerilo za usporedbu je gustoća tkanja, primjerice 9 x 9 ili 3 x 3, ako se radi o biaksijalnim tkanjima, i označava broj vlakana po cm².

Budući da bi brodice na napuhavanje s krutim prozirnim dnom bila proizvod ciljan za višu cjenovnu kategoriju među pomoćnim brodicama, za izradu tubusa odabrano je platno na bazi polietilen-klorosulfonata i polikloroprena (Hypalon/Neopren) u skladu s percepcijom veće kvalitete tog materijala kod prosječnog kupca brodice na napuhavanje. Također tehnologija izrade tubusa ovim materijalom sastoji se u potpunosti od ručnih, manufakturnih, postupaka, te bi zahtijevala manje početno ulaganje u proizvodnju.



Slika 5 - Primjer platna za izradu tubusa proizvođača Orca

4.4. MATERIJAL ZA IZRADU KRMENOG ZRCALA

Kao materijal za izradu krmenog zrcala odbrana je **šperploča**, brodograđevne klase (ljepilo AW 100), zaštićena **poliesterskim kompozitom ojačanim staklenim vlaknima**, te potom obojana UV stabilnim zaštitnim premazom.

Za izradu flanži i koljena za spoj trupa s krmenim zrcalom odabrano je mekano, lako oblikovljivo **drvo**, zaštićeno **poliesterskim kompozitom ojačanim staklenim vlaknima**.

5. PROJEKT BRODICE

Za osnivanje je odabrana brodica na napuhavanje s krutim dnom osnovnih karakteristika:

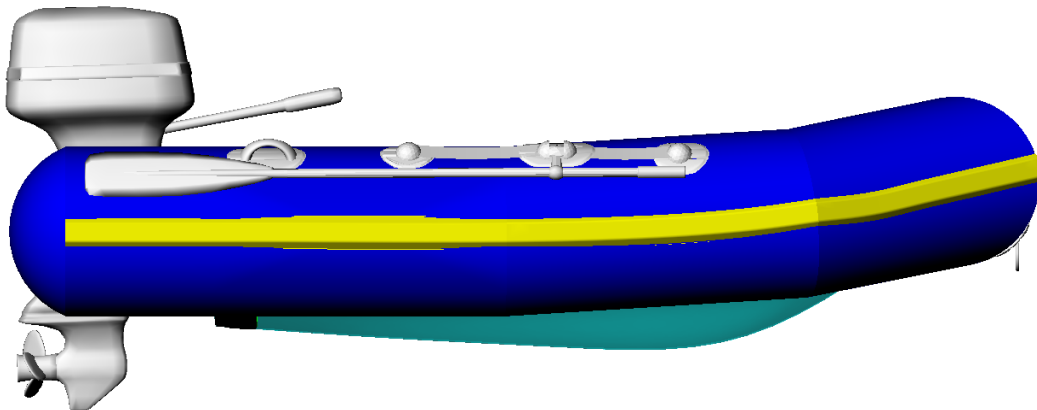
L_{OA}	2,75 m
B_{OA}	1,60 m
Φt	0,45 m
Nosivost	3 +1 osobe
Izvedba dna	kruto, twinshell
Vrsta propulzora	vanbrodski motor (s unutrašnjim izgaranjem ili električni)

Ostala svojstva biti će definirana u skladu s propisima Hrvatskog registra brodova.

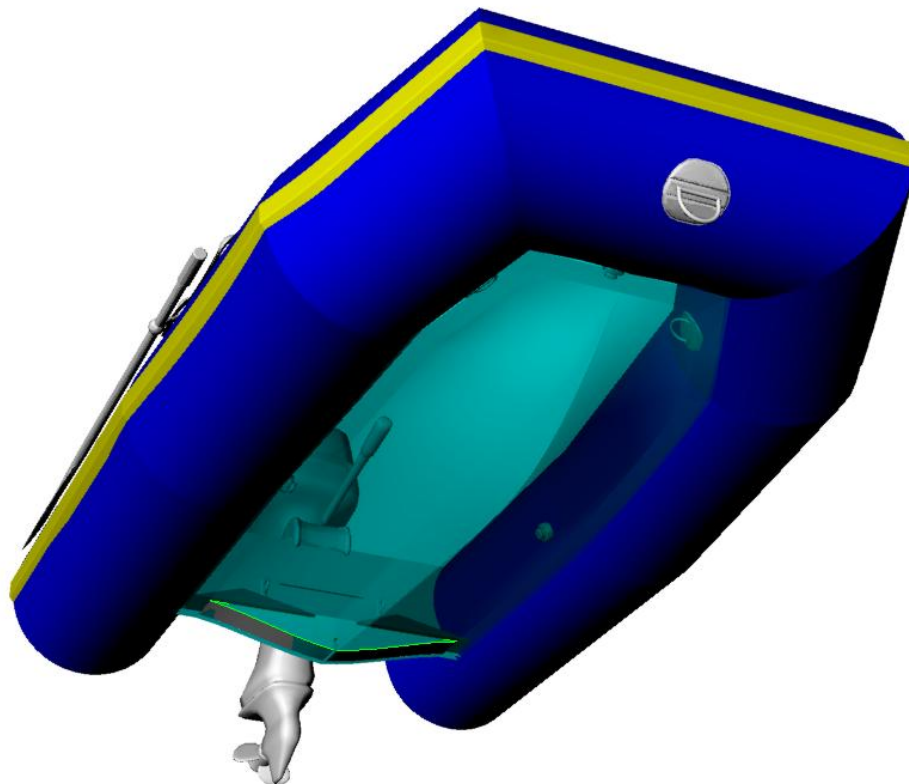
5.1. 3D - MODEL

U skladu s odabranim dimenzijama, u računalnom programu za modeliranje površina Rhinoceros, generiran je računalni 3D model brodice. Definirani su svi važniji elementi:

- Trup (gornja ljuska, donja ljuska, uzdužno rebro)
- Tubusi
- Krmeno zrcalo s koljenom i flanžom za spoj s trupom
- Oprema



Slika 6 - 3D model brodice - bočni pogled



Slika 7 - Računalni 3D model brodice podgled odozdo

5.2. NEKE VAŽNIJE ODREDBE REGISTRA

MAKSIMALAN BROJ OSOBA

6.1 Maksimalan broj osoba n neće biti veći od:

$$n = \frac{l_i}{0,38} - 1$$

Gdje je

l_i unutarnja širina, u metrima

$$n = 3,73$$

Ni pod kojim uvjetom vrijednost n , izražena u masi osoba ne smije premašiti maksimalnu nosivost (vidi 6.4)

Vrijednost n treba zaokružiti na manji cijeli broj, ali ako je prvo decimalno mjesto veće od 5 može biti dodano dijete, a ako je veće od 7, može biti dodana odrasla osoba.

Za proračun, masa odrasle osobe iznosi 75 kg, a djeteta 37,5 kg.

Odabrano je

$$n = 3 + 1 \quad \text{maksimalan broj osoba}$$

Brodica istovremeno smije prevoziti maksimalno 3 odrasle osobe i jedno dijete.

$$m_n = 262.5 \text{ kg}$$

MAKSIMALNA SNAGA MOTORA (ISO 6185-2)

6.2 Maksimalna snaga motora, u kilovatima ne smije biti veća od:

$$P_{\max} = 10 \times F(d) - 33$$

gdje je: P_{\max} maksimalna snaga motora

$F(d)$ dimenzijski factor = $l \times b$

gdje je

l dužina broda preko svega, u metrima, bez opreme

$$l = 2,75 \text{ m}$$

b širina broda preko svega, u metrima, bez opreme

$$b = 1,60 \text{ m}$$

$$F(d) = 4,4$$

$$P_{\max} = 11 \text{ kW}$$

MAKSIMALNA NOSIVOST

6.4.1 Maksimalna nosivost koju je dozvoljeno prevoziti brodicom neće biti veća od:

$$m = (0,75 \times V \times 1000) - m_b$$

Gdje je

m maksimalna nosivost, uključujući teret, osobe, opremu, motor i gorivo, izražena u kilogramima

V volumen istisnine brodice, u kubičnim metrima

3.3 Istisninom broda smatra se istisnina svih zatvorenih komora koje čine brodicu ili su za nju pričvršćene.

m_b ukupna masa brodice, u kg, uključujući brodicu i svu stalno instaliranu opremu bez motora i goriva

$$V = 0,995 \text{ m}^3$$

$$m_b = 55 \text{ kg}$$

$$m = 690 \text{ kg}$$

Preporučuje se maksimalna nosivost **$m = 420 \text{ kg}$** , izračunato prema prilagođenoj formuli:

$$m = (0,75 \times V_{T0,26} \times 1000) - m_b$$

Gdje je

$$V_{T0,26} = 0,637 \text{ m}^3 \quad \text{istisnina na gazu } T = 0,26 \text{ m od osnovice,}$$

gdje je promjer tubusa najširi

5.3.1 Brodica će biti opremljena opremom za njezino podizanje i prenošenje.

5.7 Ako brodica ima krmeno zrcalo, biti će osiguran barem jedan odvod. Za RIB brodice s zatvorenim prostorom između dna i palube biti će osiguran odvod za pražnjenje unutrašnjosti trupa.

5.10 Potrebno je osigurati prikladno mjesto za pričvrstiti uže koje osigurava motor.

5.11 Sve brodice na pramcu moraju imati osigurano mjesto za pričvrstiti uže za vuču.

6.7.1 Brodica će biti opremljena užetom ili drškom na bokovima za koje se mogu uhvatiti osobe koje sjede u brodici ili su u moru.

6.8.1 U slučaju da se najveća zračna komora probuši, preostala istisnina će biti veća od 50% propisanog maksimalnog kapaciteta.

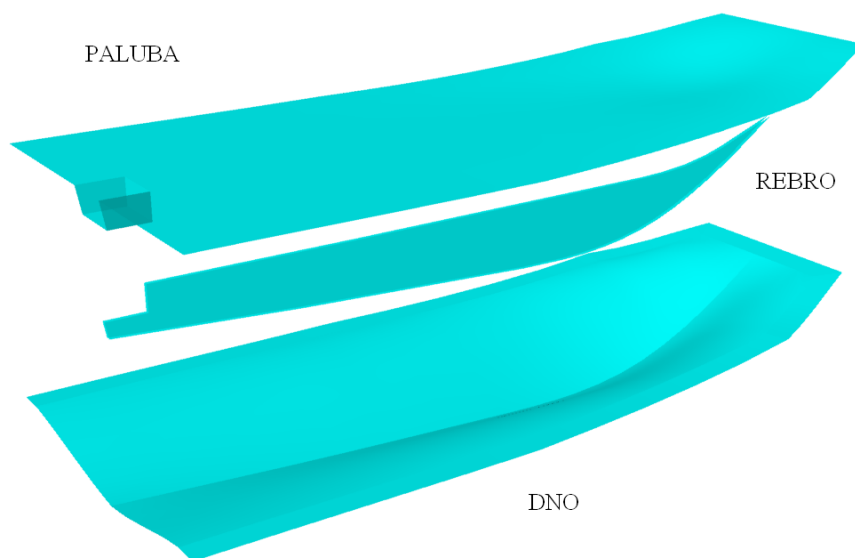
$$\Delta_{t \frac{1}{2}} = 463 \text{ kg} > m_{0,5} = 210 \text{ kg} \quad \text{uvijet je zadovoljen}$$

5.3. KONSTRUKCIJA TRUPA

Trup RIB brodice može biti izveden od jedne ili dvije ljuske (engl. monoshell ili twinshell). Odabrana je izvedba s dvije ljuske (twinshell), ukružena uzdužnim rebrom. Trup se sastoji od tri konstruktivna elementa:

- Dno blagi V-profil, osigurava hidrodinamička svojstva
- Paluba Ravna površina za kretanje
- Rebro smanjenjem nepoduprtog raspona osigurava krutost brodice

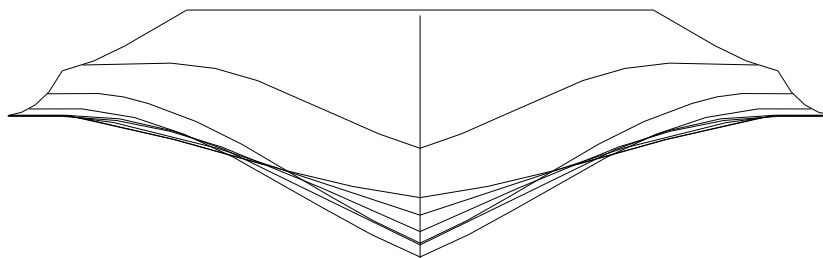
Sva tri elementa izrađena su od PMMA (polimetil-metakrilat) **debljine 1 cm.**



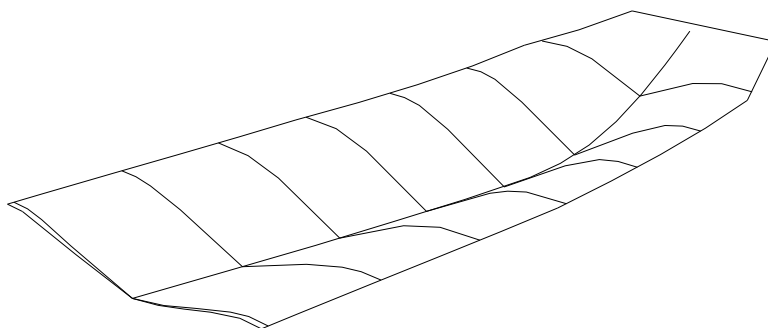
Slika 8 - Dijelovi trupa

Trup mora zadovoljiti dostatnu krutost i čvrstoću, uz prihvatljivu masu. Debljina je odabrana u skladu s iskustvima proizvođača PMMA-a. Na računalu, u program Solidworks CosmosXpress Analysis Wizard, izvršena je jednostavna FEM analiza savijanja upete ploče dimenzija ekvivalentnih jednoj uzdužnoj polovici palube, tlačno opterećena pritiskom od $3,6 \text{ kN/m}^2$ (prema ISO 12215-5, 5.3). Rezultati su potvrdili da su naprezanja ispod dopuštenih a najveći progib, na sredini ploče, iznosi 1,03 mm.

Dno



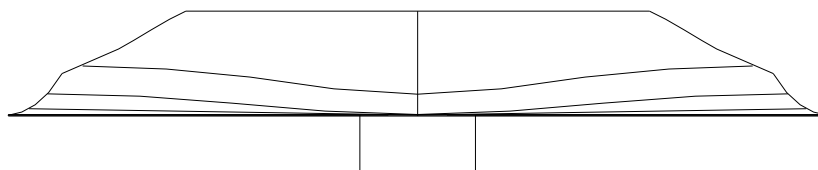
Slika 9 - Forma dna



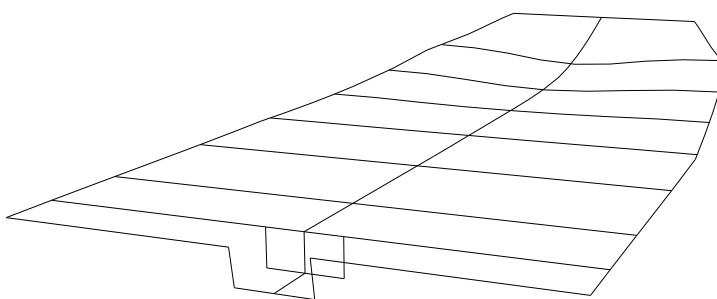
Slika 10 - Žičani model dna

Dno brodice bilo bi poželjno zaštititi glatkim premazom protiv grebanja. Nikakvi antivegetativni premazi nisu mogući jer bi onemogućili gledanje kroz trup. Kako bi spriječili obraštanje dna, brodicu bi trebalo s vremena na vrijeme izvaditi iz mora i obrisati glatkom tkaninom što vlasniku ne bi trebalo predstavljati problem jer se pomoćne brodice ionako najčešće transportiraju i skladište na suhom (na palubi broda ili na krmenoj platformi, na obali).

Paluba



Slika 11 - Nacrt palube



Slika 12 - Žičani model palube

Palubu je poželjno zaštititi premazima protiv klizanja, za sigurnije kretanje kada je paluba mokra, i za ulazak i izlazak iz brodice, te premazom protiv grebanja kako bi se zadržala što bolja prozirnost i produljio vijek trajanja brodice. Nude se prozirni premazi na bazi poliuretana koji nude oba svojstva.

Rebro



Slika 13 - Rebro

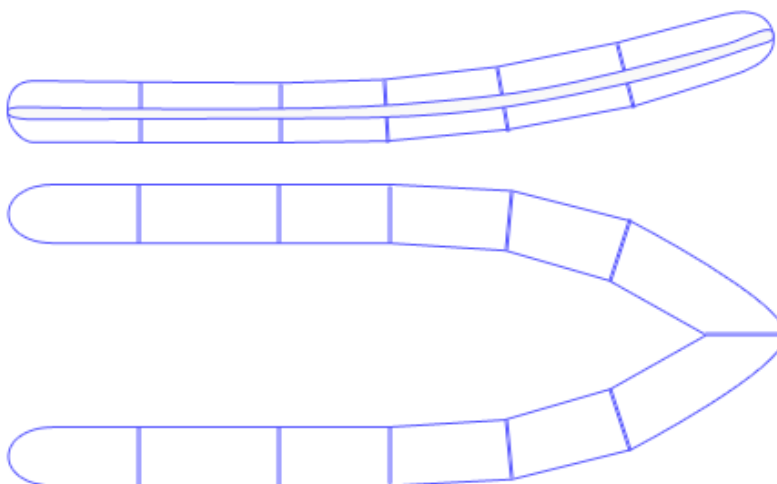
5.4. KONSTRUKCIJA TUBUSA

Tubusi na RIB brodici su zračne komore smještene najčešće po razmi trupa. Mogu biti izrađene od različitih materijala (plastomeri ili elastomeri). Brodici pružaju dodatnu istisninu i stabilitet. S vanjske strane, po obodu tubusa, nalazi se zaštitna traka izrađena od tvrdog polimera.

Tubusi se izrađuju tako da se platno koje se nabavlja u rolama reže po pripremljenim šablonama i lijepi kako bi se dobio željeni oblik.

Postoji nekoliko najčešće korištenih izvedbi ovisno o formi trupa i načinu montaže na trup^[6]:

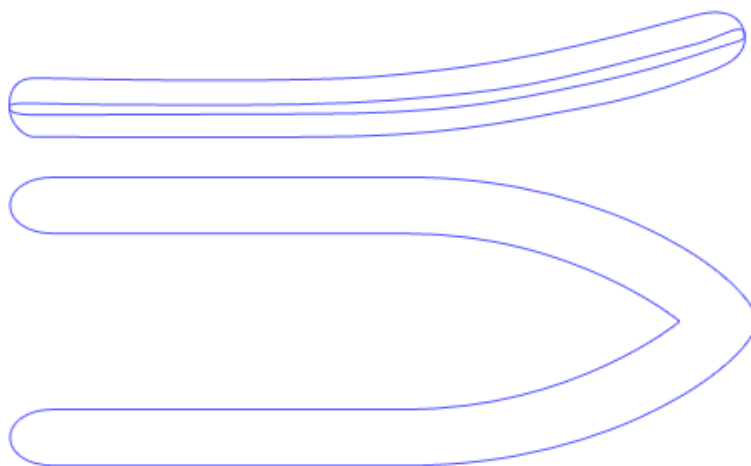
Tubus s ravnim segmentima



Slika 14 - Tubus s ravnim segmentima

Tubus s ravnim segmentima spada u “stariji dizajn”, iako ga neki proizvođači još uvijek upotrebljavaju radi jednostavnije izrade i robustnijeg izgleda. Izrađuje se od više ravnih sekcija koje se međusobno lijepe ili zavaruju, a s vanjske strane ostaje vidljiva traka na spojevima između sekcija.

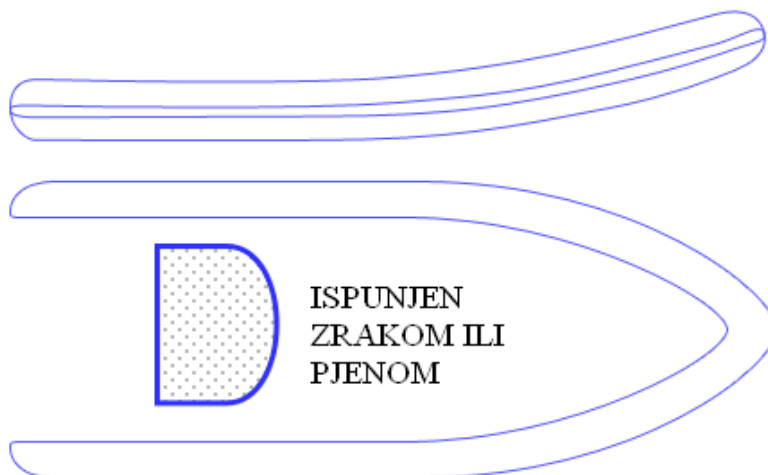
Zaobljeni tubus



Slika 15 - Zaobljeni tubus

Ovo je moderniji dizajn tubusa. Kvalitetna izrada i montaža ovakvog tubusa zahtijeva veću vještinu radnika. Pri krojenju platna, prije lijepljenja, potrebno je paziti na elastičnosti materijala. Sve je češća upotreba i promjenjivog radijusa što dodatno doprinosi estetici brodice. Postupak izrezivanja platna po šablonama ostavlja više škart materijala nego kod tubusa s ravnim segmentima. Šav lijepljenog spoja potrebno je izvesti što neprimjetnije kako ne bi narušio estetiku tubusa i najčešće je skriven ispod zaštitne trake na obodu.

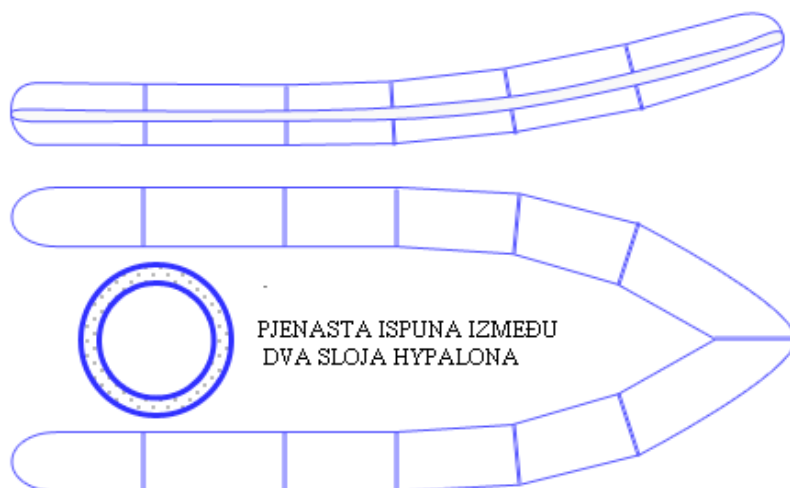
Tubus D-presjeka



Slika 16 - Tubus D-presjeka

Tubus D-presjeka osmišljen je kako bi se povećao korisni volumen unutar brodice. Koristi se rjeđe nego prethodne dvije izvedbe i obično samo na većim RIB brodicama. Može biti ispunjen pjenom ili zrakom. Pjena smanjuje mogućnost da se tubus probije, ali onemogućuje da se tubus ispuše radi lakšeg skladištenja ili transporta.

Tubus sendvič-konstrukcije

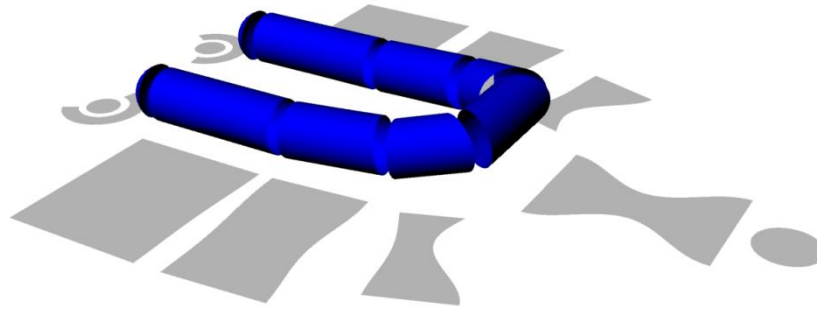


Slika 17- Tubus sendvič-konstrukcije

Sendvič-konstrukcija tubusa upotrebljava se na brodicama koje će biti korištene na način da često postoji opasnost od sudaranja s drugim brodicama, pontonima ili obalom, kao što je to primjer s komercijalnim ili radnim brodicama. Između dva sloja platna nalazi se pjenasti material koji znatno smanjuje rizik da se tubus probuši. Obično je izveden od spojenih ravnih segmenata.

5.5. ODABIR TUBUSA

Odabran je **tubus s ravnim segmentima** radi jednostavnosti izrade. Sastoji se od **12** međusobno spojenih segmenata (4 krmena, 2 stražnja bočna, 2 srednja bočna, 2 prednja bočna, 1 pramčani i 1 pramčana pregrada).



Slika 18 - Raskroj materijla tubusa

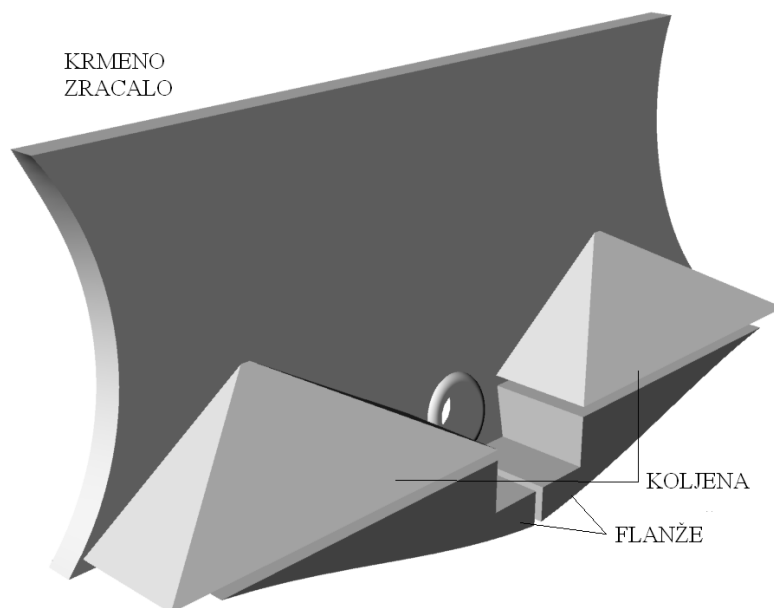
Broj zračnih komora unutar tubusa

6.10 Minimalan broj zračnih komora, tj. odjeljenja unutar tubusa, prema Tablici 2:

- za maksimalnu snagu motora između 7,5 kW i 15 kW ($P_{max} = 11$ kW),
- za dimenzijski faktor $F(d)$, (vidi 6.2), $F(d) = 4,4 < 5$,

iznosi **2 zračne komore**, jednakih dimenzija. Pregrada se nalazi na sredini pramčanog segmenta tubusa u uzdužnoj simetrali broda.

5.6. KONSTRUKCIJA KRMENOG ZRCALA



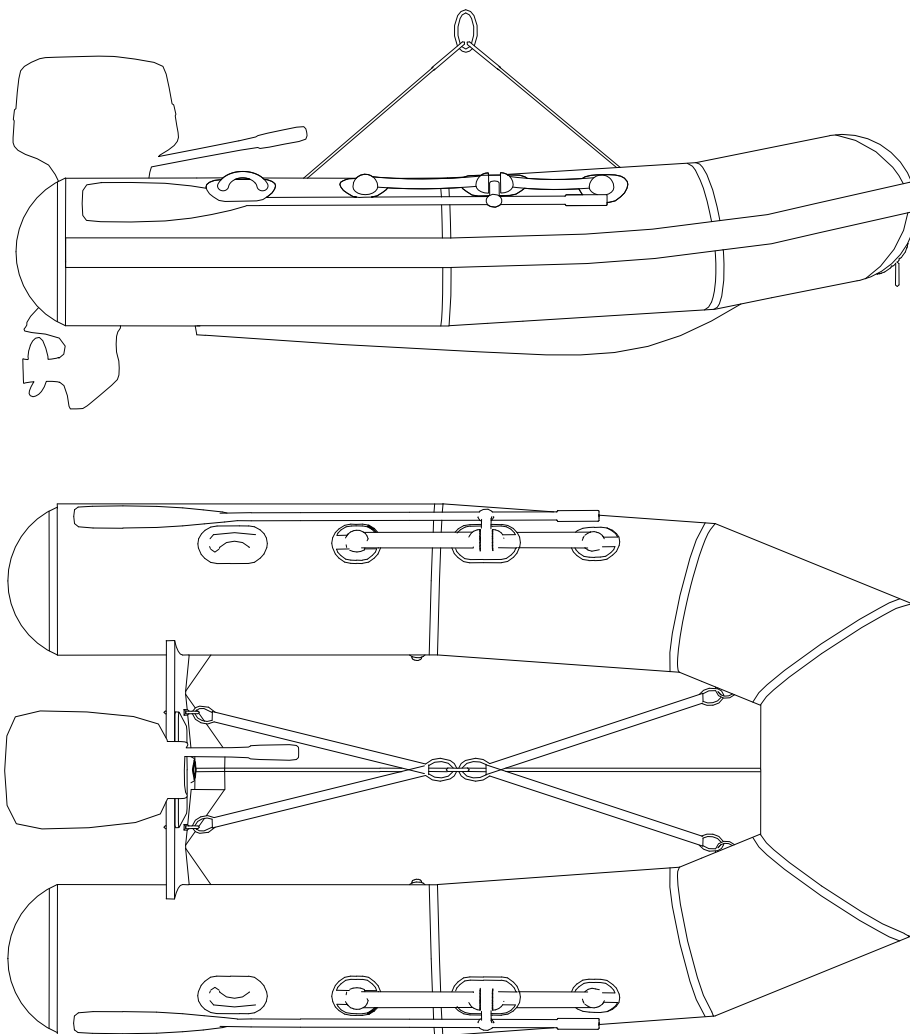
Slika 19 - Krmeno zrcalo

Krmeno zrcalo izrađeno je od vodootporne šperploče debljine 2 cm, dimensionirano prema sličnom brodu.

Na ploču krmenog zrcala spojena su **dva koljena** i **dvije flanže** koje služe da bi se spojili krmeno zrcalo i trup.

Sustav krmenog zrcala, koljena i flanži dodatno je zaštićen i ojačan poliesterskim kompozitom ojačanim staklenim vlaknima.

5.7. OPĆI PLAN



Slika 20 - Brodica na napuhavanje s prozirnim dnom, bokocrt i tlocrt

NOSIVOST

- Broj osoba, $n = 3$
- Istisnina tubusa, $\Delta_t = 905 \text{ l}$

DIMENZIJE

- Duljina preko svega $l = 2,75 \text{ m}$
- Unutarnja duljina $l_i = 1,85 \text{ m}$
- Širina preko svega $b = 1,60 \text{ m}$
- Unutarnja širina $b_i = 0,70 \text{ m}$
- Promjer tubusa $\Phi_t = 0,45 \text{ m}$

- Masa brodice s opremom, $m_b = 55 \text{ kg}$
bez motora i goriva
- Masa s brodice opremom, $m_{uk1} = 97 \text{ kg}$
vanbrodskim motor 10 kW i gorivom
- Masa brodice s opremom, $m_{uk2} = 360 \text{ kg}$
motorom, gorivom i maks. brojem osoba

VANBRODSKI MOTOR

- Duljina osovine kratka
- Max. snaga motora $P_{\max} = 11 \text{ kW}$
- Spremnik goriva prijenosni, 12 l

TUBUSI

- Materijal platno CSPR/CR
- Ojačanje bočna zaštitna traka

TRUP

- Materijal PMMA poli(metil-metakrilat)
- Odvod 1

KRMENO ZRCALO

- Materijal vodootporna špreploča
i poliesterski kompozit ojačan
staklenim vlaknima
- Koljena x 2
- Flanže x 2
- Ploča za montažu motora, aluminijska x 1

DIZANJE I VUČA

- Pramčani prsten, s vanjske strane, za vuču 1
- Krmeni prsten za vuču, s unutrašnje strane, za vuču 2
- Pramčani prsten, s unutrašnje strane, za podizanje 2
- Krmeni prsten, s unutrašnje strane, za podizanje 2

6. NUMERIČKA ANALIZA OTPORA

Otpor brodice analiziran je računalnim programom za numeričku mehaniku fluida **STAR-CCM+** 4.02.007, (CFD software, engl. „Computer Fluid Dynamics“) kojim je simulirano strujanje fluida i distribucija tlaka oko trupa brodice **fiksnog položaja** pri **brzini od 5 m/s**. Mreža je generirana istim programom.

CFD programi^[7] su jedna od grana mehanike fluida koja koristi numeričke metode i algoritme za rješavanje i analizu problema toka fluida. Računala se koriste kako bi obradila ogroman broj računskih operacija koje proizlaze iz diskretiziranog oblika diferencijalnih jednadžbi koje opisuju fluid i nametnutih rubnih uvjeta. Osnova gotovo svih CFD programa su **Navier-Stokes jednadžbe**, ili njihov pojednostavljeni oblik, **Eulerove jednadžbe**, u kojima je zanemaren utjecaj viskoznosti. Područje se još uvijek razvija kako bi se točnije i brže riješili problemi kompleksnog ponašanja fluida.

CFD paketi sastoje se od **3 cjeline**:

Predprocesor - Definiranje forme i domene, generiranje mreže, postavljanje rubnih uvjeta.

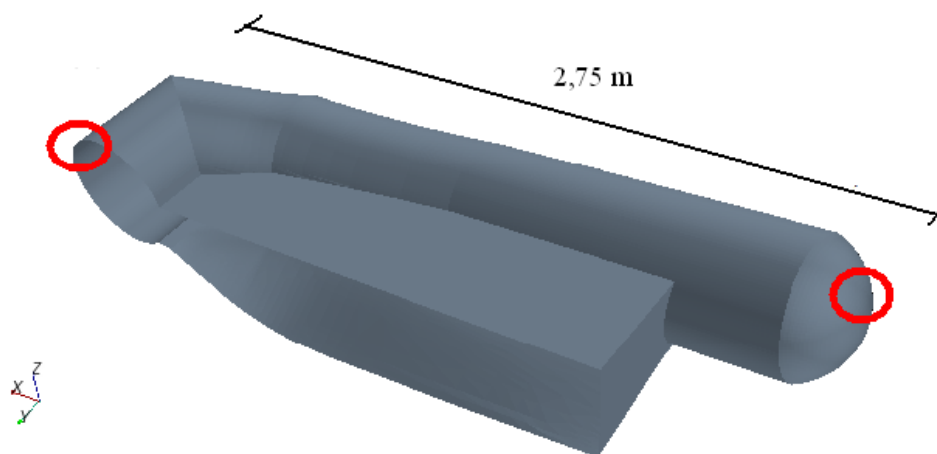
Procesor - Odabir fizikalnog modela, računanje.

Postprocesor - Analiza, obrada i dokumentiranje dobivenih rezultata.

6.1. PREDPROCESOR

Učitavanje forme

U STAR-CCM+ je učitani 3D model brodice. Pošto je brodice simetrična po uzdužnoj XZ ravnini radi uštede računalnih resursa, čije opterećenje može biti znatno prilikom CFD simulacija, razmatrana je samo polovica trupa.

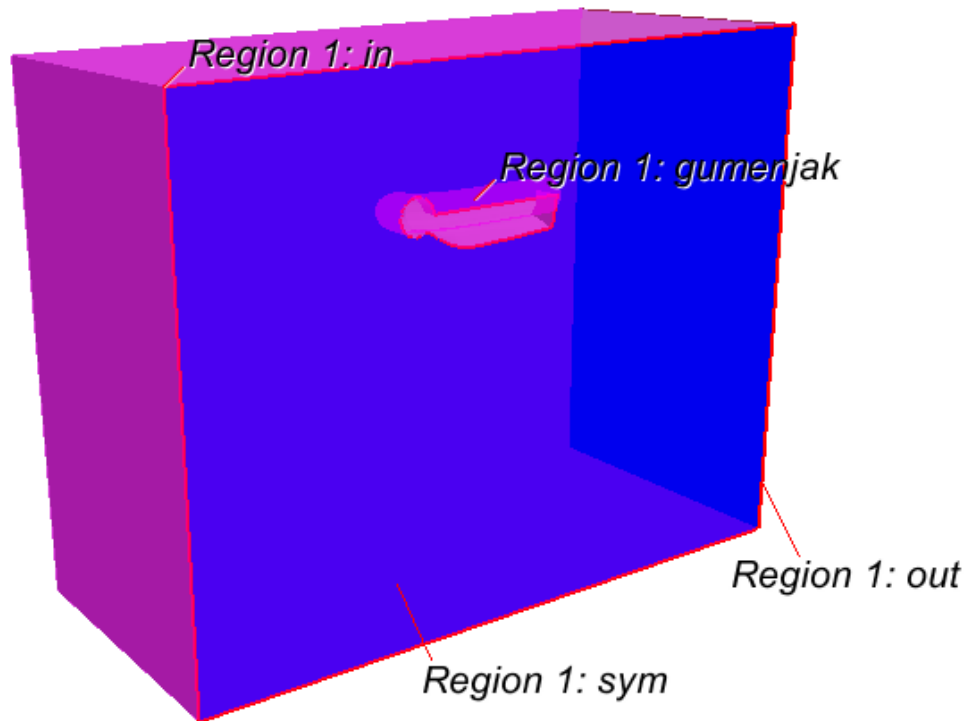


Slika 21 - 1/2 brodice učitana u STARCCM+ za analizu otpora

Forma je učitana pomoću **IGES**^[8] formata (Initial Graphics Exchange Specification). IGES format služi kao neutralni format pri razmjeni između različitih CAD programa. Nakon što je učitana 1/2 forme, bilo je potrebno izvršiti provjeru dimenzija i provjeriti da prilikom razmjene i učitavanja nije došlo do grešaka, primjerice pukotina u formi. Program nudi jednostavan i automatiziran alat za provjeru te su sve greške ispravljene na toleranciju od 0,001 mm.

Definiranje domene fluida i rubni uvjeti

Oko forme je definirana **domena fluida**, pravokutnog oblika dimenzija 9 x 4 x 7 m. Veličina domene mora biti definirana tako da utjecaj stijenki ne poremeti strujanje oko trupa, a da ne bude prevelika kako se ne bi bespotrebno trošili računalni resursi. Od domene je potom oduzet oblik brodice kako bi ostao samo fluid među **graničnim ploham** (engl. boundary) koje su definirane kako slijedi:



Slika 22- Domena fluida

Ispravan odabir svojstava graničnih ploha nužan je za kvalitetno rješenje, jer se odabirom graničnih ploha vrši odabir **rubnih uvijeta** problema. Odabrane granične plohe predstavljaju:

Inlet	Ulaz fluida: Brzina $v = 5 \text{ m/s}$; Smjer $x = -1, y = 0, z = 0$;
Outlet	Izlaz fluida
Sym	Ravnina simetrije
Gumenjak	Zid (nepropusna granica)

Diskretizacija domene

Prostor domene potrebno je diskretizirati kako bi se fizikalne jednačbe (engl. governing equation), koje opisuju dinamiku fluida koju je potrebno opisati, mogle riješiti numerički. Korišteni program, kao i većina CFD programa, zasniva se na **metodi konačnih volumena** (FVM, engl. Finite Volume Method). Metoda polazi od integralnog oblika jednačbi bilance količine gibanja, topline i mase.

Domena rješenja podijeljena je na konačan broj malih kontrolnih volumena koji odgovaraju računskoj mreži. Diskretizirana verzija integralnog oblika primjenjuje se na svaki kontrolni volumen.

Cilj je dobiti set linearnih algebarskih jednažbi, s ukupnim brojem nepoznanica u svakom sustavu jednažbi, jednakim broju ćelija u mreži. Ako su jednažbe nelinearne potrebno je koristiti iterativne tehnike kako bi se problem linearizirao. Dobivene linearne jednažbe potom je moguće računalno riješiti.

Generiranje računske mreže

Od domene fluida izrađen je mrežni model koristeći alat za izradu mreže koji je integralni dio programa. Alat za generiranje mreže jednostavan je za korištenje zahvaljujući visokom stupnju automatiziranosti. Alati za izradu mreža, pogotovo trodimenzionalnih, vrlo su kompliciran proizvod i još su uvijek u fazi razvoja. Visoki stupanj automatiziranosti i robustnost komercijalnih alata, pa tako i ovog, imaju negativnu osobinu- korisnik nema pregled nad procesima, već samo nad početnim postavkama i konačnim rezultatom. Na taj način kada alat nije u mogućnosti ponuditi rješenje, korisnik ne zna uzrok, već može samo metodom pokušaja i pogrešaka odabirom početnih postavki doći do rješenja.

Prvo je definirana **površinska mreža, bazne veličina ćelije** odabrano je **0.4 m**.

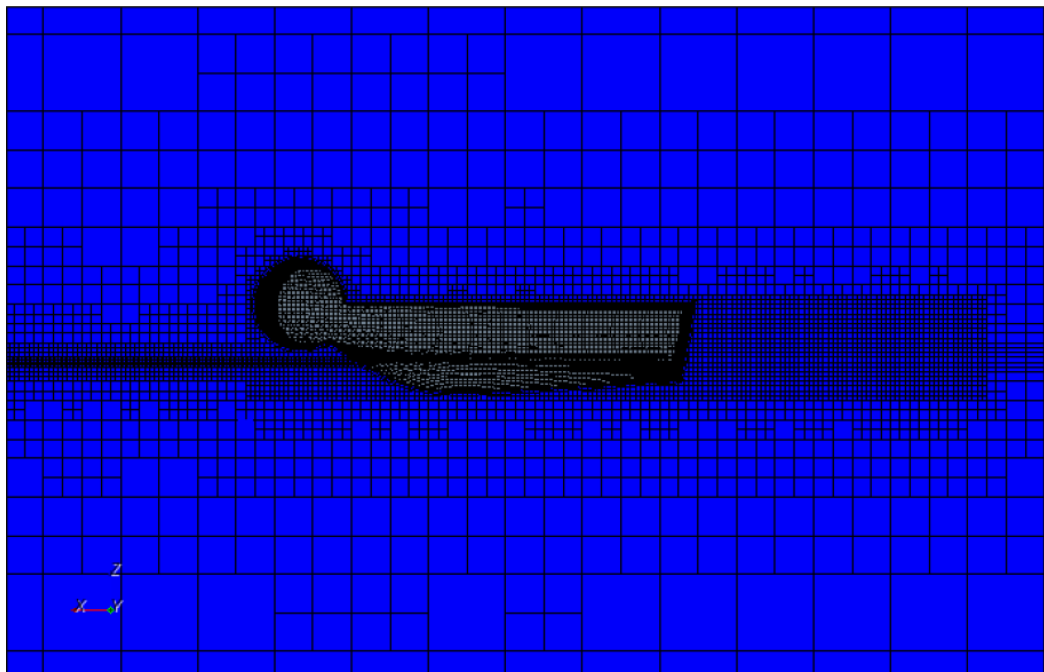
Veličina ćelija je kompromis točnosti rezultata i vremena računanja (CPU time, Central Processing Unit time). Potrebno je odabrati s obzirom na procesorske mogućnosti računala na kojem radimo proračun i efekata u fluidu koje želimo modelirati. Korisnik mora poznavati fizikalna svojstva strujanja i pojave koje očekuje, na osnovu čega odabire fizikalni model po kojem će se raditi proračun i veličinu mreže. Prefina mreža rezultirat će bespotrebnim preopterećenjem računala i predugim čekanjem na rezultate, a pregruba će dati netočne rezultate.

Rezolucija dobivene mreže je odgovarajuća u rubovima domene ali je potrebno usitniti u područjima posebnog interesa:

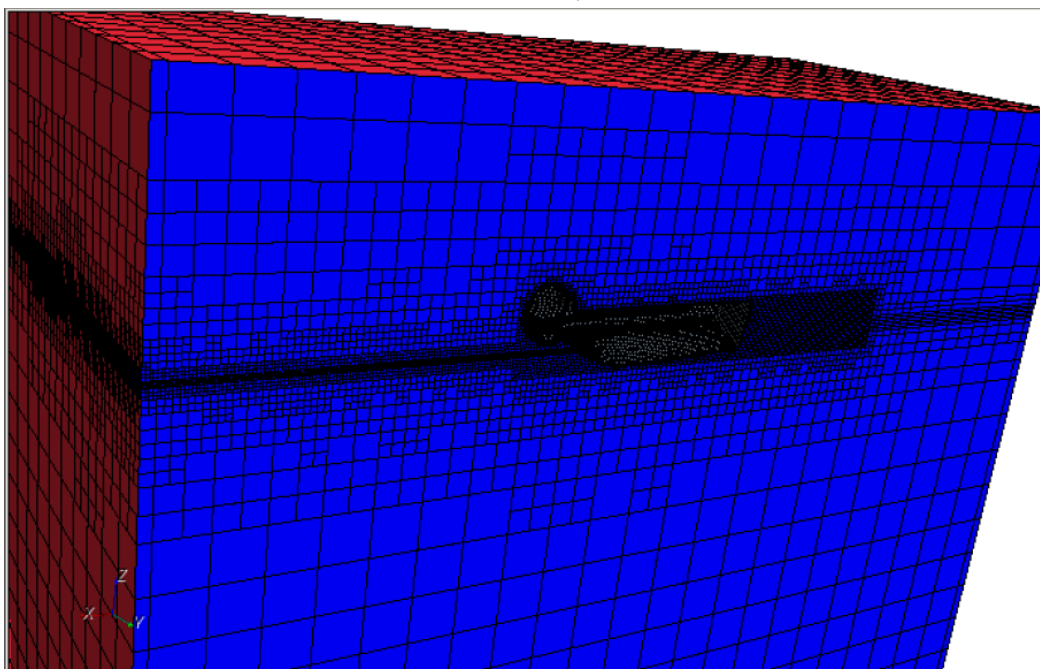
- | | |
|--|-------------------------------------|
| - Granični sloj oko trupa brodice | 3 sloja, 6 % veličine bazne ćelije |
| - Šire područje oko trupa brodice | od 12% veličine bazne ćelije naviše |
| - Gdje će se definirati slobodna površina | 6 % i 12% veličine bazne ćelije |
| - U području gdje je očekivan pramčani val | 6 % i 12% veličine bazne ćelije |
| - U području gdje je očekivano odvajanje strujanja | 12% veličine bazne ćelije |

Nakon što je dobivena zadovoljavajuća rezolucija površinske mreže prema njoj je generiran volumni mrežni model izrađen od heksaedarskih volumnih ćelija.

a)



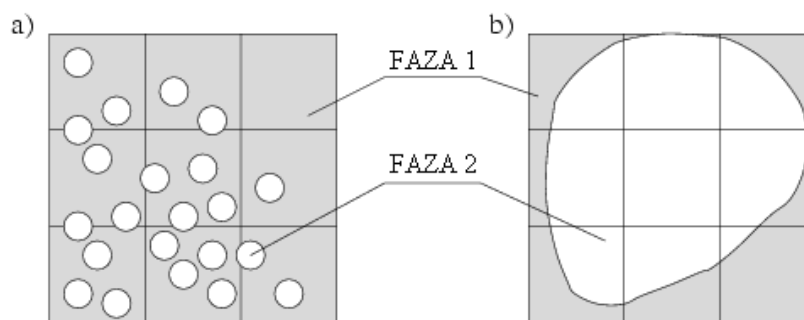
b)



Slika 23 - Volumni mrežni model od heksaedarskih ćelija

Modeliranje slobodne površine

Slobodna površina modelirana je pomoću VOF modela (engl. Volume Of Fluid). VOF^[9] je jednostavan višefazni model namijenjen simulaciji više fluida koji se ne miješaju, na numeričkoj mreži na kojoj je moguće razlučiti granicu faza, kako je prikazano na slici.



Slika 24 - Mreža za simulaciju strujanja koristeći VOF: a) neprikladna, b) prikladna

Zbog numeričke efikasnosti model je prikladan za simulacije strujanja gdje svaka faza tvori veću strukturu, s relativno malom dodirnom površinom među fazama.

6.2. PROCESOR

Odabir fizikalnog modela

Odabirom fizikalnog modela u CFD programu određujemo koje formule želimo upotrijebiti kako bismo opisali ponašanje fluida, tj. koje fizikalne pojave želimo simulirati.

Korišten je **K-Epsilon turbulentni model**. Ovo je „model dvije jednačbe“ u kojem se jednačbe gibanja rješavaju za turbulentu kinetičku energiju k , i brzinu disipacije te energije ε . Tijekom proteklih desetljeća razvijali su se različiti oblici ovog modela, te je postao najrašireniji model za industrijske primjene.

Kriterij zaustavljenja proračuna

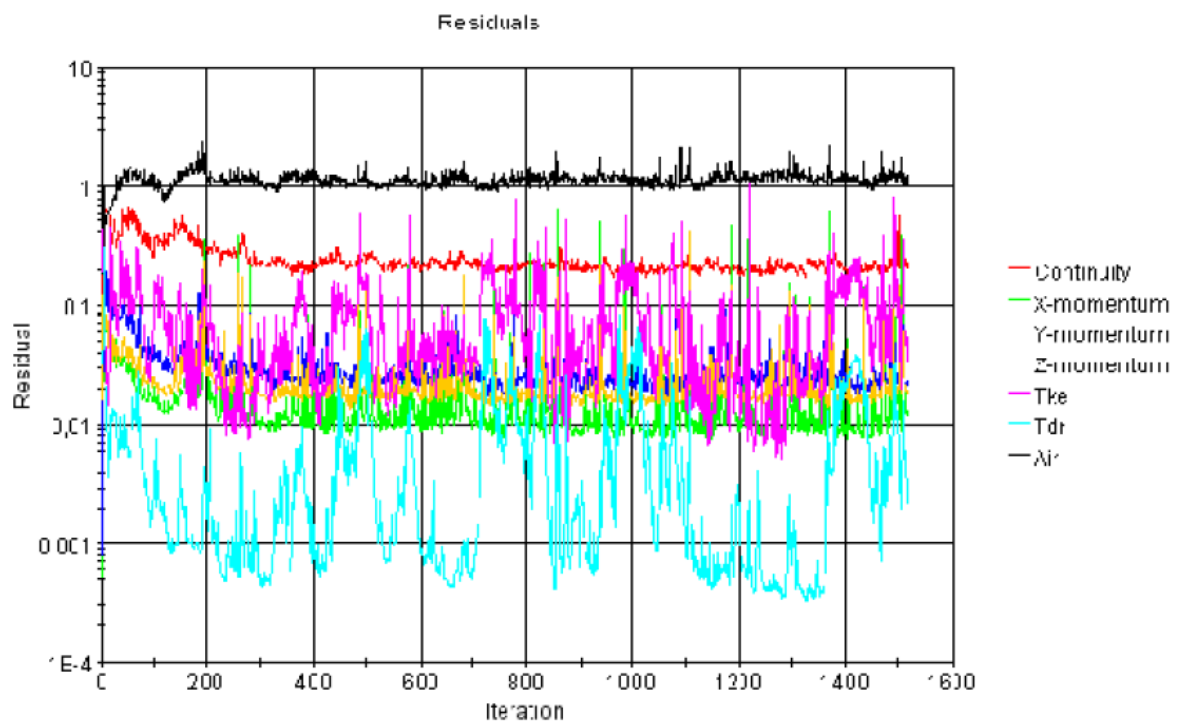
Kriterij zaustavljanja proračuna odabire se prema:

- Vrsti proračuna (stacionarno, nestacionarno strujanje),
- Mjeri konvergencije rezultata,
- Količini vremena koja je korisniku na raspolaganju,
- Potrebnoj točnosti.

Korištene su sljedeće postavke:

maksimalno fizikalno vrijeme	1 sekunda (strujanje je stacionarno)
broj koraka unutar maksimalnog vremena	1000
broj unutrašnjih iteracija po koraku	20

Mjerilo konvergencije rješenja je dijagram rezidualnih vrijednosti. Ovaj dijagram predstavlja količinu greške po iteracijama za svaku jednačbu. Povoljno je kada količina greške, tj. iznos rezidualnih vrijednosti teži u nulu ili postane stabilno. Neprihvatljivo je da rezidualne vrijednosti rastu jer to znači da rješenje divergira. Takav proračun je potrebno zaustaviti i kontrolirati odabrane postavke.

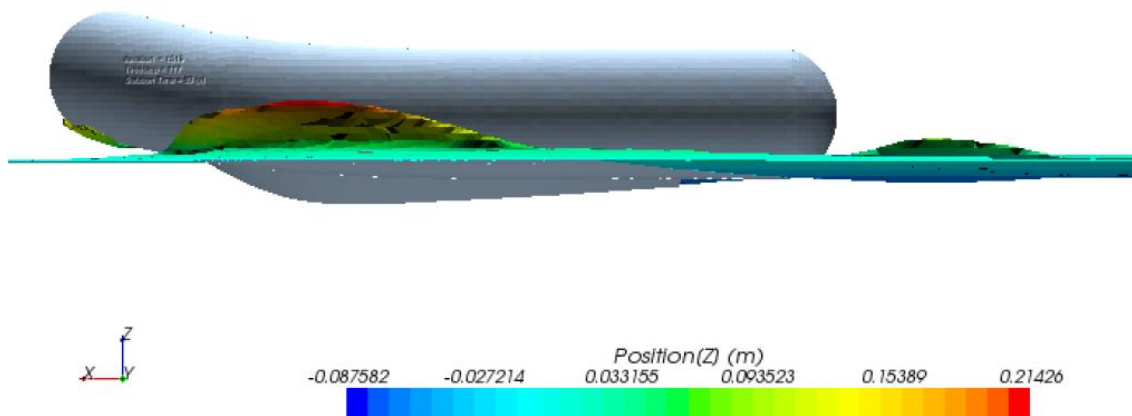


Slika 25- Kriterij zaustavljanja: Rezidualne vrijednosti

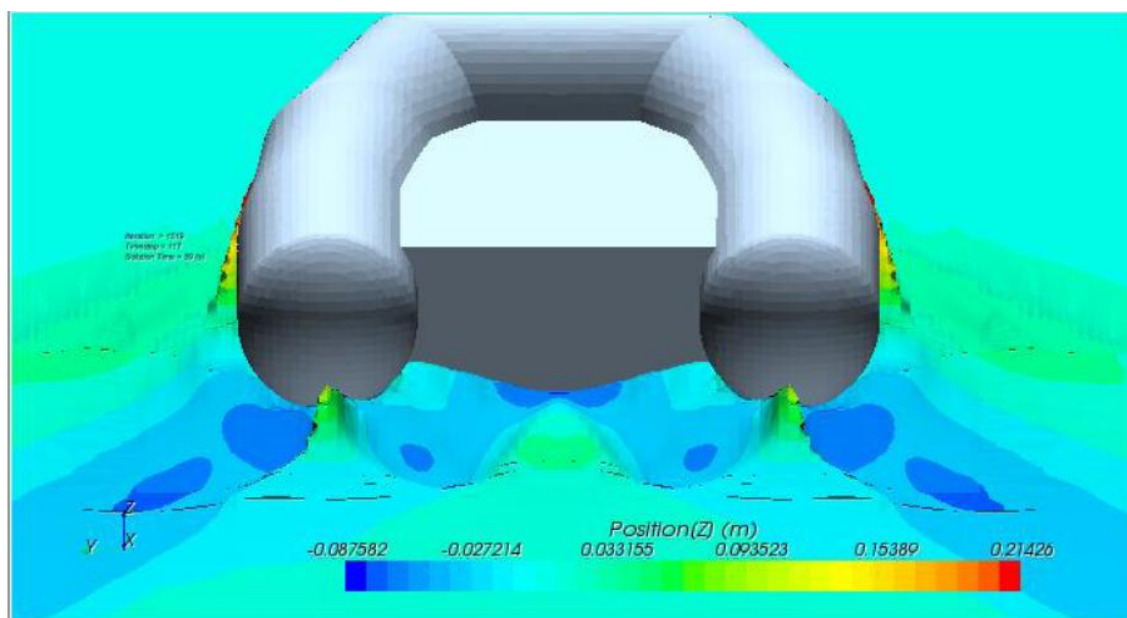
Vidljiv je pad rezidualnih vrijednosti unutar svakog koraka.

6.3. POSTPROCESOR

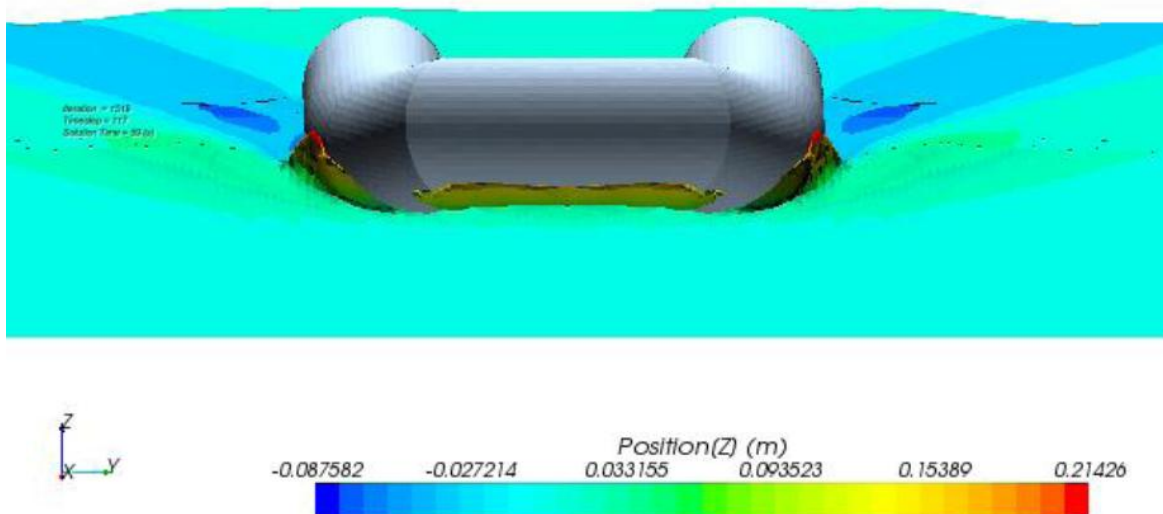
Elevacija morske površine



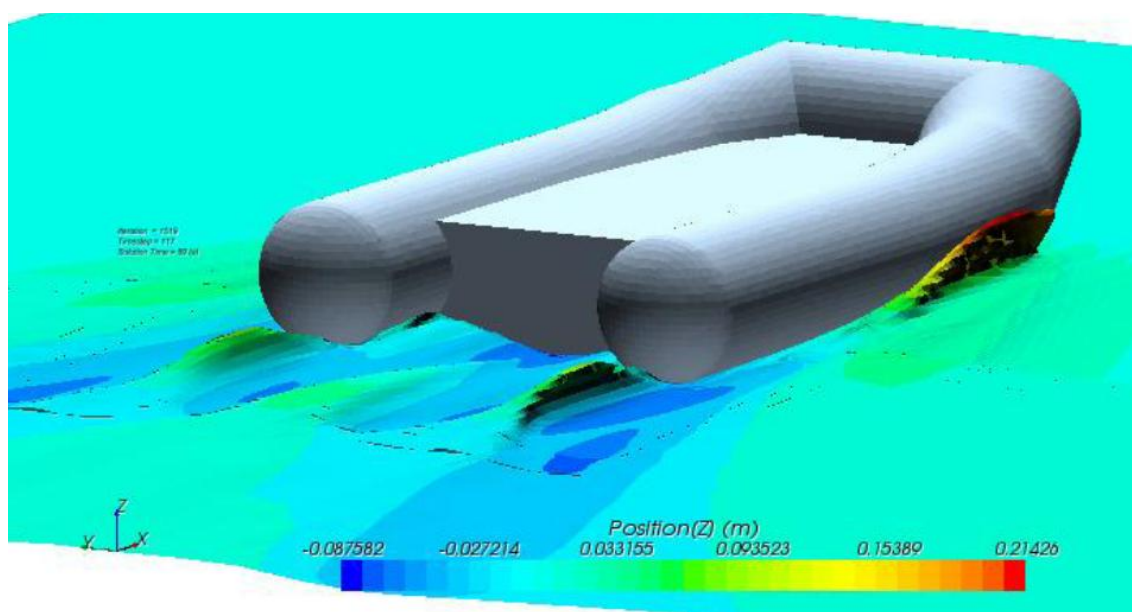
Slika 26 - Elevacija morske površine, bočni pogled



Slika 27 - Elevacija morske površine, pogled s krme



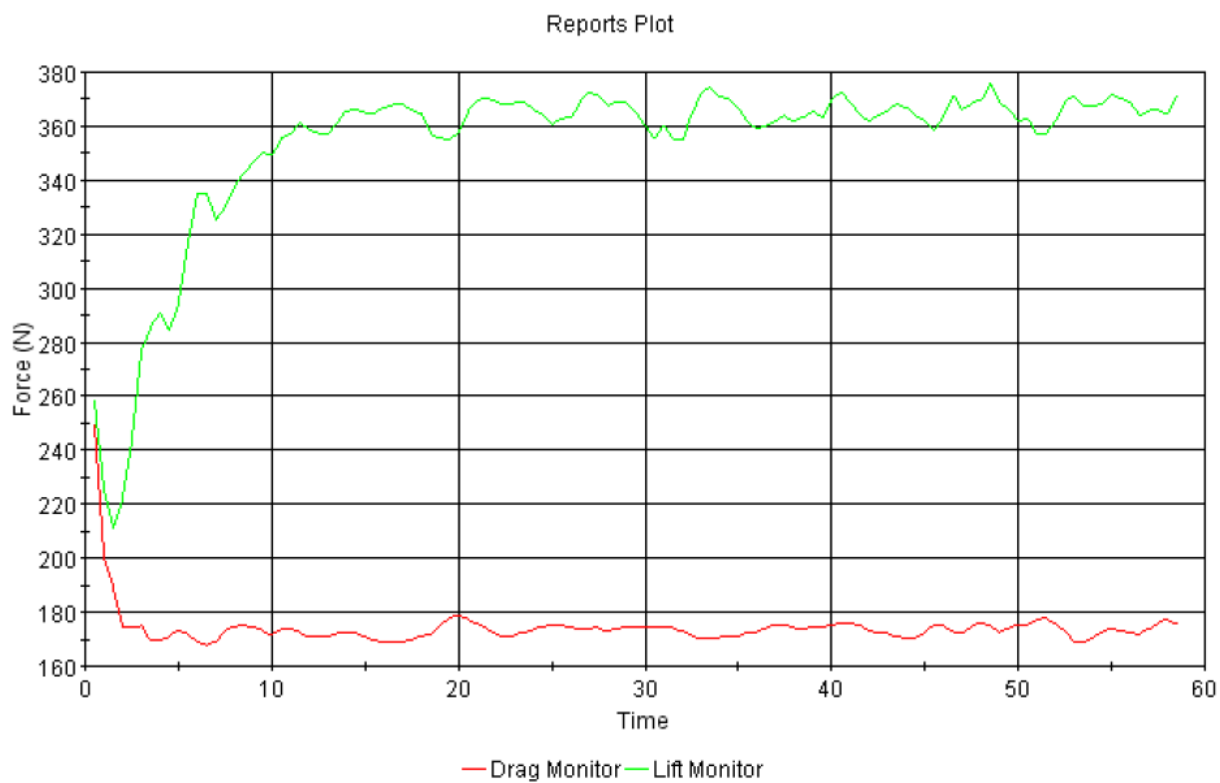
Slika 28 - Elevacija morske površine, pogled s pramca



Slika 29 - Elevacija morske površine, perspektiva

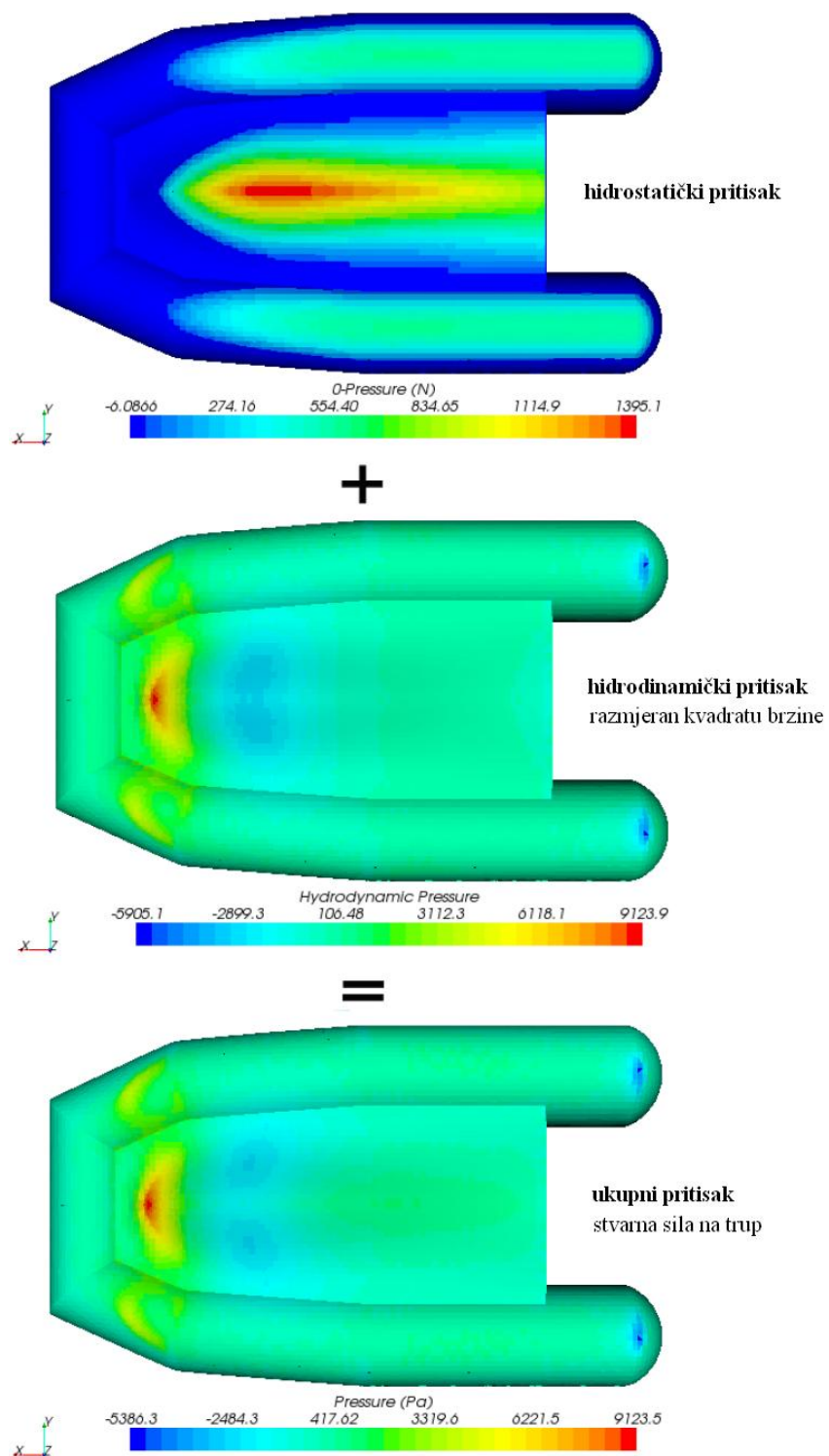
Rezultati deformacije slobodne površine su fizikalno logični i očekivani.

Dijagram sile otpora i uzgona



Slika 30 - Dijagram sile otpora i uzgona

Distribucija tlaka na dnu brodice



Slika 31 - Distribucija tlaka na dnu brodice

7. TEHNOLOGIJA

7.1. TOPLINSKO OBLIKOVANJE PLASTOMERA

Za oblikovanje trupa od PMMA-a prikladan je postupak toplinskog oblikovanja. Toplinsko oblikovanje^[10] spada u cikličke postupke obrade polimera (plastomera) preoblikovanjem poluproizvoda tijekom kojeg se bez odvajanja čestica mijenja oblik, a moguće je postići i veću čvrstoću ili poboljšanje nekih drugih svojstava materijala. Pritom fizičke veze među molekulama ostaju očuvane.

Za toplinsko oblikovanje osim poli(metil-metakrilata) prikladni su i mnogi drugi plastomeri. Od njih za izradu manjih rekreativnih i ribarskih brodica i kajaka koriste se:

- Polietilen visoke i niske gustoće (HD-PE, LD-PE);
- Terpolimer akrilonitril/butadien/stiren (ABS);
- Poli(vinil-klorid) (PVC).

Općenito su svojstva brodica izrađenih od navedenih plastomera lošija od brodica izrađenih od kompozitnih materijala, međutim cijenom su osjetno povoljnije zbog jeftinije sirovine te brže i jednostavnije tehnologije izrade, pa za pomoćne i manje brodice nude isplativu alternativu.

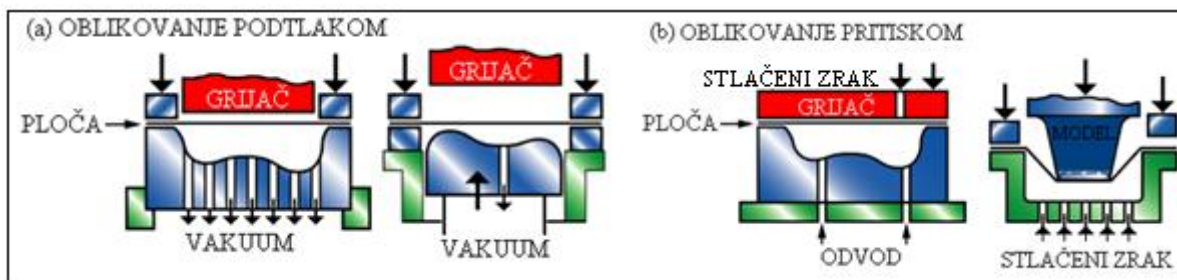
Kao pripremci za toplo oblikovanje služe filmovi, folije ili ploče izrezane iz ekstrudiranih ili kalandiranih trakova ili izravnim i posrednim prešanjem te lijevanjem.

Osnovni parametri toplog oblikovanja jesu temperatura preoblikovanja i stupanj preoblikovanja. Stupanj preoblikovanja je omjer izratka i početnih izmjera priprema, pri čemu se pod izmjerom podrazumijeva debljina stijenke, površina, duljina i širina.

Temperatura preoblikovanja označava radnu temperaturu priprema na početku procesa preoblikovanja. Ovisi o vrsti plastomera, potrebnom stupnju preoblikovanja i vrsti postupka. Optimalna temperatura jest ona pri kojoj je čvrstoća priprema najniža a deformabilnost najviša. To je karakteristika gumastog stanja u koje se priprema dovodi zagrijavanjem na temperaturu između temperature staklišta (T_g) i temperature taljenja (T_t).

Postupci toplog oblikovanja dijele se u 4 skupine: savijanje, pritiskivanje, razvlačenje, mješoviti postupci.

Trup brodice moguće je izraditi postupkom razvlačenja koji je ujedno i najrašireniji postupak oblikovanja plastomera. Pri postupku razvlačenja dolazi do promjene debljine stijenke. Na sljedećim slikama prikazani su neki od postupaka toplinskog oblikovanja razvlačenjem:



Slika 32 - Toplinsko oblikovanje: a) podtlakom, b) pritiskom

Oblikovanje podtlakom općenito daje slabiju reprodukciju detalja na izratku nego oblikovanje pritiskom.

Neovisno o postupku oblikovanja vrijede sljedeće smjernice^[10]:

1. Cijelu ploču treba uniformno zagrijati na radnu temperaturu
2. Oblikovanje treba biti gotovo prije nego se ijedan dio ploče ohladi ispod minimalne temperature oblikovanja
3. Izradak treba hladiti polagano i uniformno i odvojiti od kalupa prije nego se potpuno ohladi.

Nakon oblikovanja potrebno je odrezati višak materijala koji se ne može direktno reciklirati. Tipični proizvodi koji se izrađuju ovim postupcima su: kućanski aparati, kade, prozori zrakoplova i brodski trupovi.

Za postupak izrade trupa brodice na napuhavanje od PMMA-a, zbog debljine ploče i potrebe za što finijim površinama, u skladu s preporukama proizvođača PMMA-a odabran je **toplinski postupak oblikovanja između dva kalupa** (muškog i ženskog).

Paluba i dno brodice oblikuju se iz ploča **dimenzija: 200 x 100 x 1 cm**.

PMMA ploče apsorbiraju malu količinu vlage iz okoline, te ih je potrebno sušiti prije oblikovanja. Nedovoljno sušenje može uzrokovati pojavu mjehurića tijekom zagrijavanja što narušava mehanička i optička svojstva izratka.

PMMA ploče suše se prisilnom konvekcijom u peći s cirkulirajućim zrakom. Preporučeno je ploče ostaviti preko noći na temperaturi od 80° C. Potom se zagrijavaju na radnu temperaturu:

$$\text{Radna temperatura,} \quad Tr = 165^{\circ} \text{ C}$$

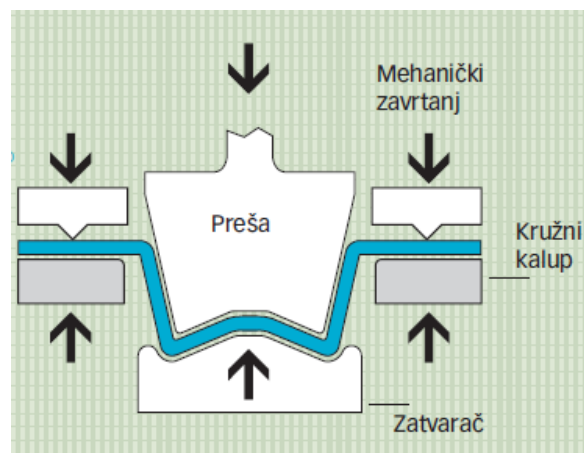
Previsoka radna temperatura može dovesti do degradacije materijala, a preniska do pojave naprezanja koja bi mogla uzrokovati pojavu pukotina u eksploataciji.

Ploče navedenih dimezija najprikladnije je zagrijavati u peći s cirkulacijom zraka. Točno vrijeme zagrijavanje određuje se testiranjem, a kao okvirno pravilo zagrijavanja u cirkulacijskoj peći vrijedi 1 minuta za svakih 0,25 mm debljine ploče, tj. za ploču debljine 10 mm vrijeme zagrijavanja je oko 40 minuta.

Prilikom zagrijavanja bez čvrstog okvira doći će do skupljanja ploče do 2 % u dužinu i širinu i do zadebljanja ploče do 4 %.

Vrijeme oblikovanja ovisi o temperaturi ploče, kalupa i okoliša, i o debljini ploče. Važno je završiti oblikovanje prije nego se temperatura u ploči spusti ispod 135° C. Oblikovanje ispod ove temperature uzrokovati će neželjena naprezanja u materijalu i gubitak svojstava. Kalupe je, ako to dozvoljava materijal izrade poželjno zagrijati na cca. 70° C kako bi se izbjeglo naglo hlađenje površine ploče.

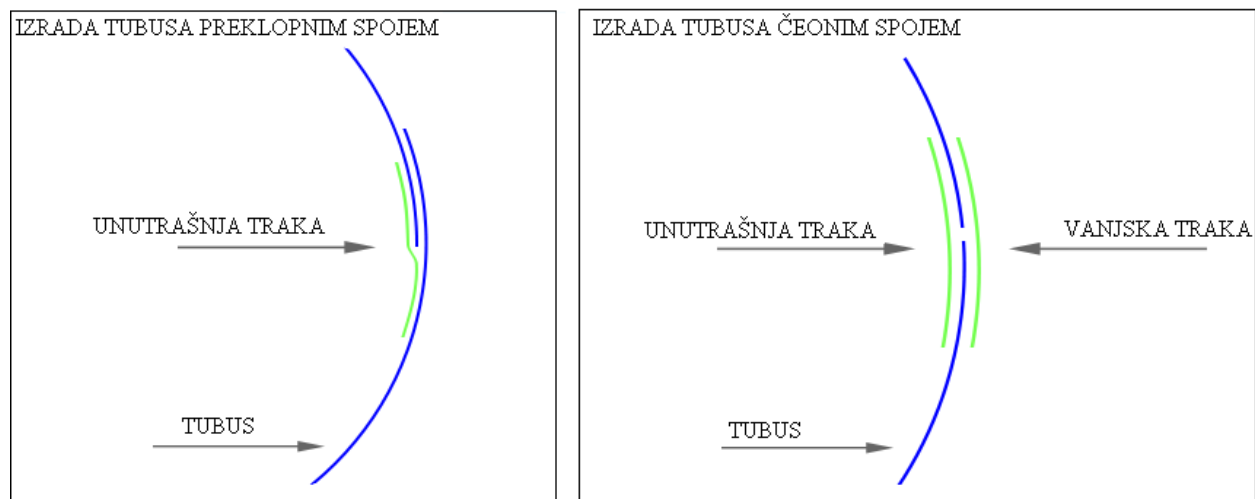
Hlađenje treba biti polagano i što je više moguće uniformno. Ovisno o materijalu kalupa i njegovom potencijalu odvođenja topline moguće je sustav kalupa i izratka prekriti kako bi se hlađenje usporilo ili uvesti kontrolirani sustav hlađenja rashladnim medijem kontrolirane temperature.



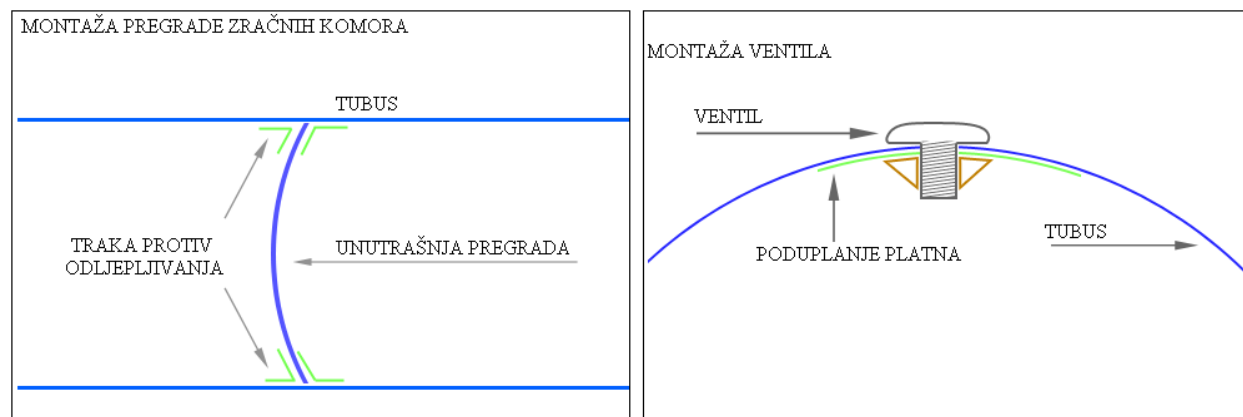
Slika 33 - Toplinsko oblikovanje trupa između 2 kalupa

7.2. IZRADA TUBUSA

Tubusi se, pošto se platno izreže prema šablonama, sklapaju lijepljnjem. Na sljedećim slikama prikazani su najčešći spojevi, detalj pregrade zračnih komora unutar tubusa i montaža ventila:



Slika 34 - Izrada tubusa

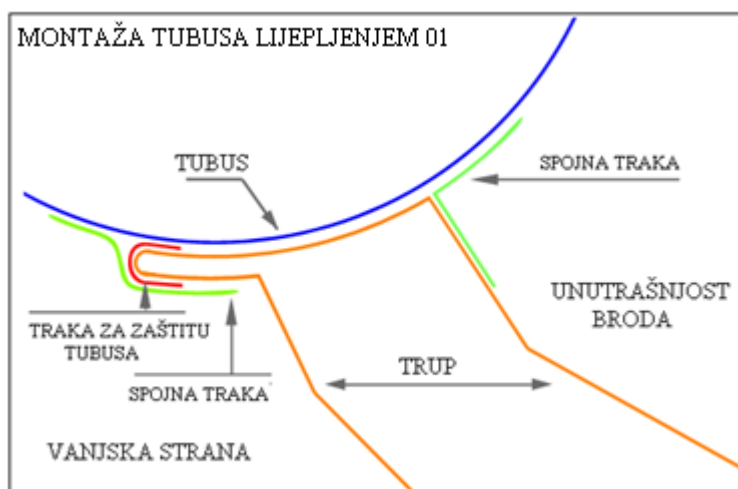


Slika 35 - Montaža pregrade zračne komore i ventila

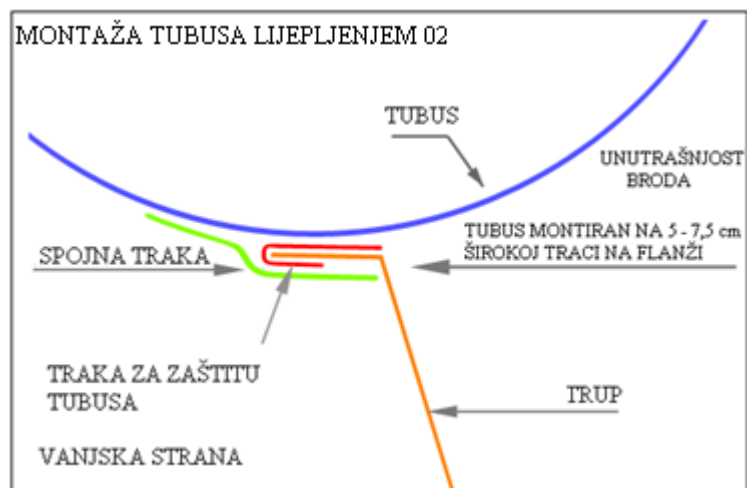
7.3. MONTAŽA TUBUSA NA TRUP

Montaža lijepljenjem

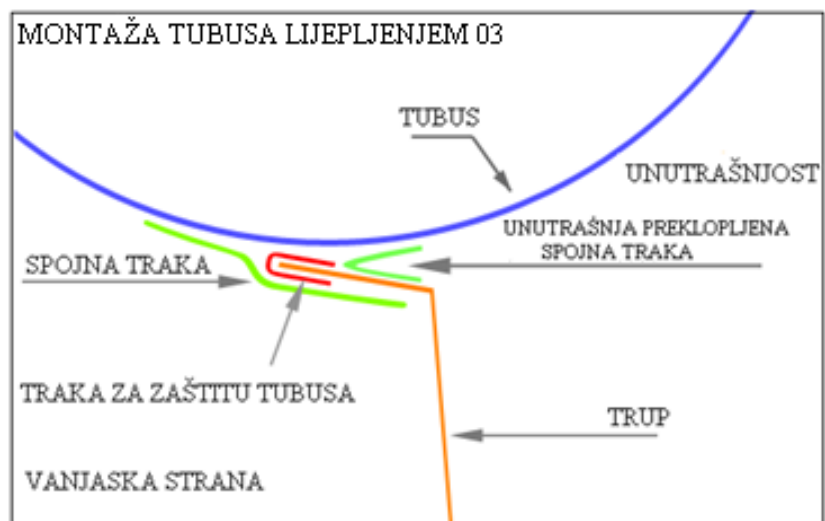
Montaža lijepljenjem je najčešća metoda spajanja tubusa i trupa. Postoji mnogo varijacija ovisno o izvedbi trupa:



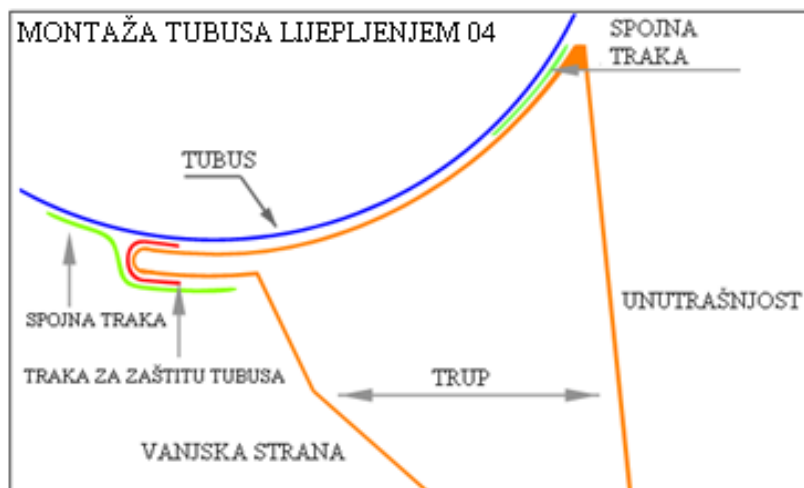
Slika 36 - Montaža tubusa lijepljenjem 01



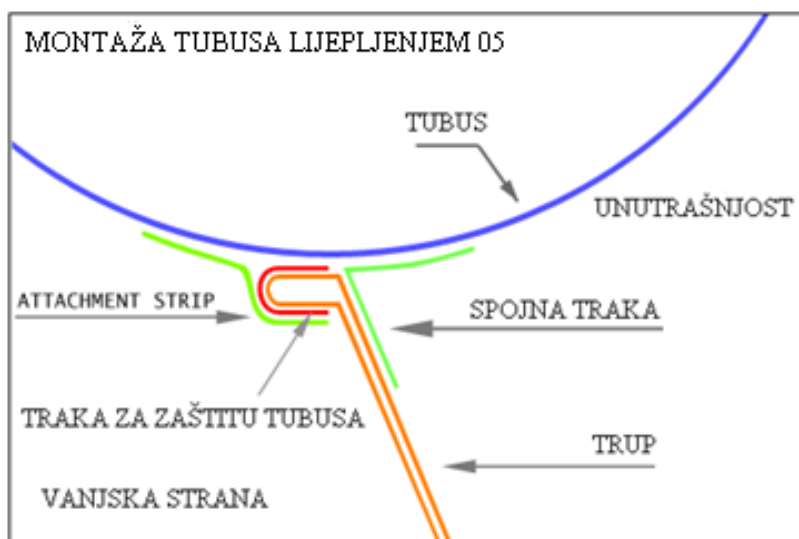
Slika 37- Montaža tubusa lijepljenjem 02



Slika 38- Montaža tubusa lijepljenjem 03



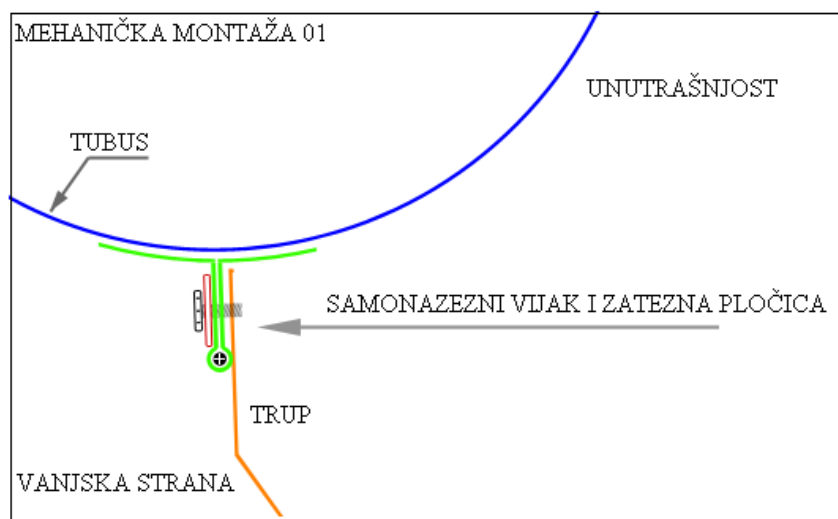
Slika 39- Montaža tubusa lijepljenjem 04



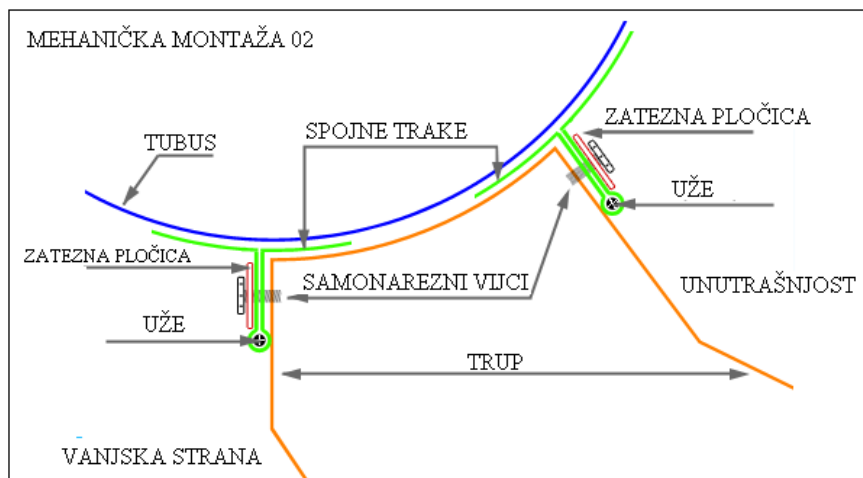
Slika 40- Montaža tubusa lijepljenjem 05

Prema flanži trupa odabrana je montaža tubusa na trup metodom lijepljenja broj 02.

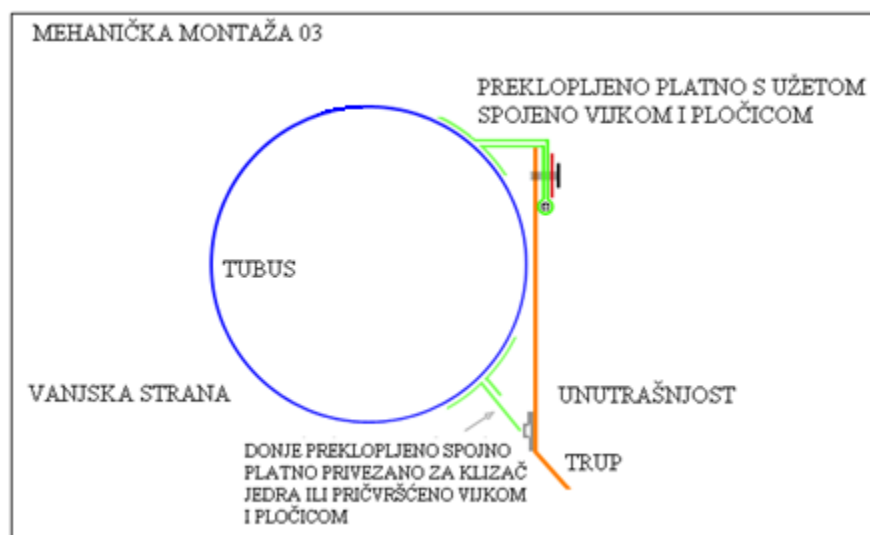
Montaža tubusa vijcima



Slika 41- Montaža tubusa vijcima 01

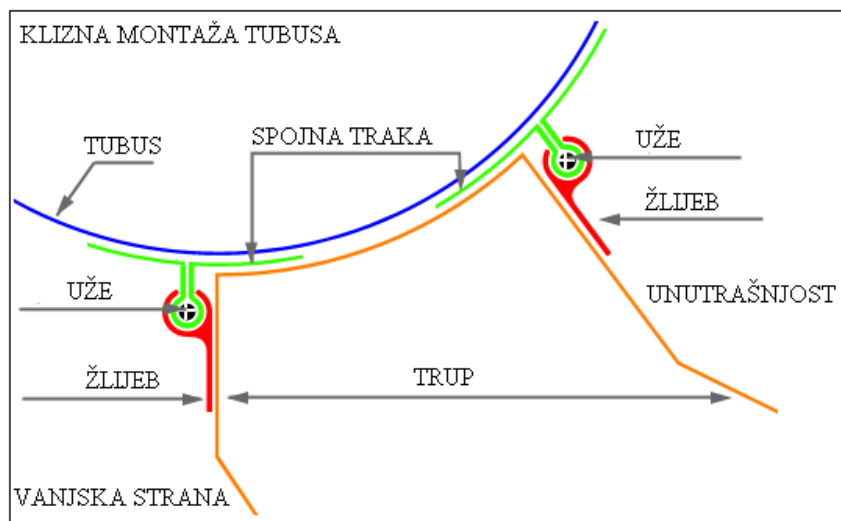


Slika 42- Montaža tubusa lijepljenjem 02



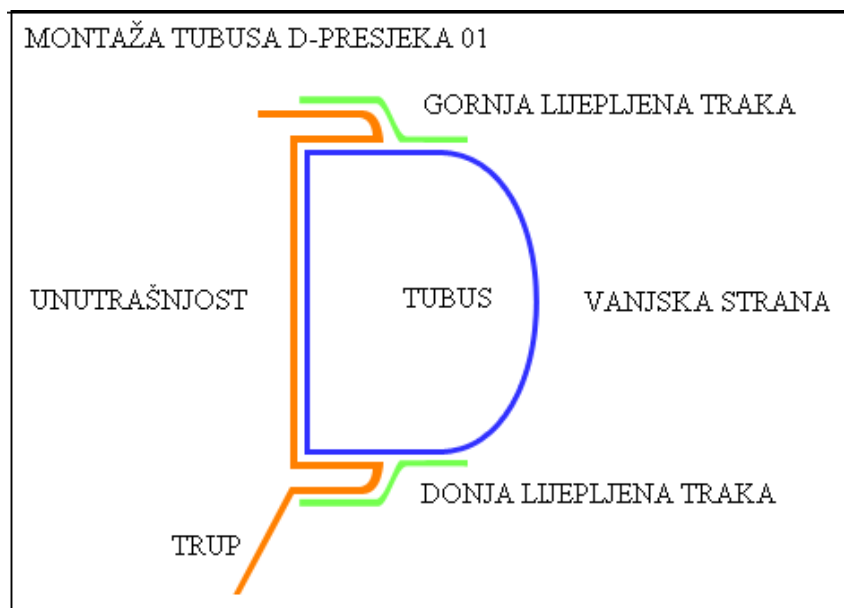
Slika 43- Montaža tubusa lijepljenjem 03

Klizna montaža tubusa

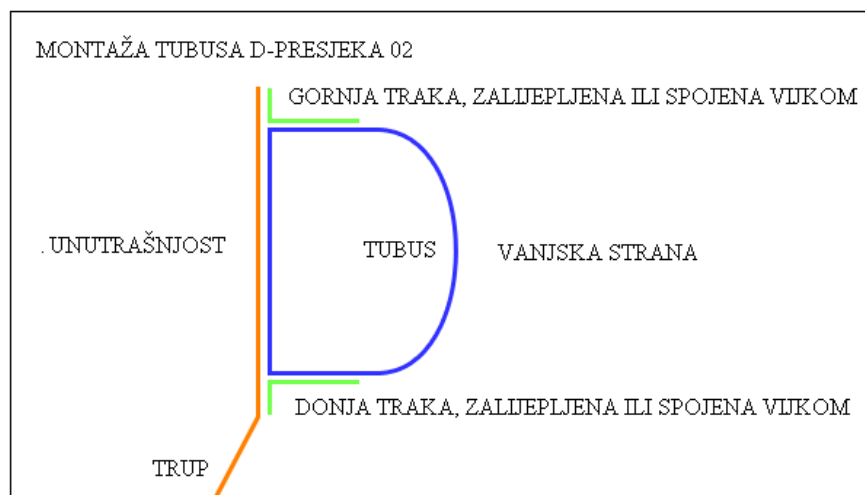


Slika 44- Klizna montaža tubusa

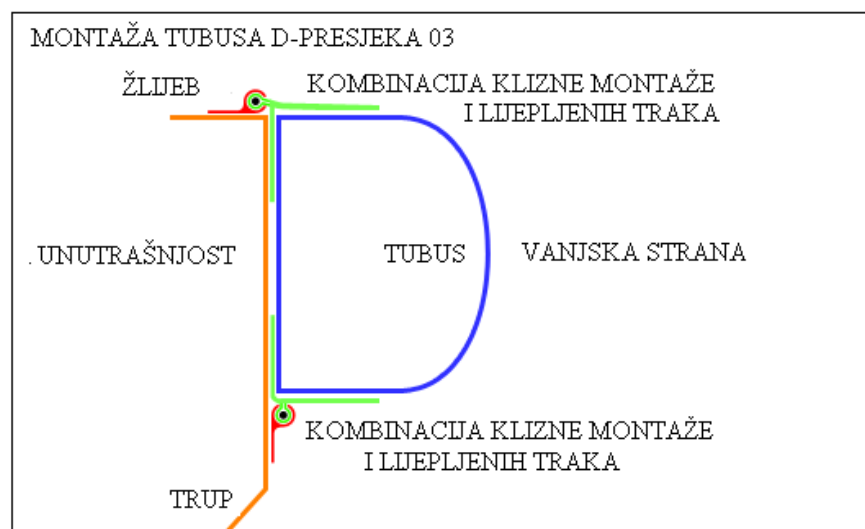
Montaža tubusa D-presjeka



Slika 45 - Montaža tubusa D-presjeka 01



Slika 46 - Montaža tubusa D-presjeka 02



Slika 47 - Montaža tubusa D-presjeka 03

8. ISPITIVANJE LIJEPLJENIH SPOJEVA

Tehnologija izrade brodice na napuhavanje većinom se svodi na lijepljenje. Ljepila za izradu i montažu tubusa propisuje proizvođač platna ovisno o vrsti materijala. Uvođenje PMMA-a kao konstrukcijskog materijala za izradu trupa otvara pitanje adekvatnih ljepila za spajanje samog trupa i trupa s ostalim dijelovima brodice. Stoga je izvršeno ispitivanje lijepljenih spojeva u kombinacijama materijala i ljepila kakve je moguće upotrijebi pri izradi ove brodice.

Ispitani su sljedeći sustavi lijepljenih spojeva:

- PMMA – PMMA,
- PMMA – DRVO (šperploča, vodootporna, brodograđevne klase),
- PMMA – KOMPOZIT (poliesterski kompozit ojačan staklenim vlaknima),

u kombinaciji s sljedećim adhezivima:

- SikaFlex 295UV- ljepilo na bazi poliuretana,
- Diklormetan - organsko otapalo,
- Loctite SuperAttak - ljepilo na bazi cianoakrilata,
- Poliesterska smola sa staklenim ojačanjem,
- Collacryl KD - komercijalno ljepilo za PMMA na bazi otapala i monomera,
- Otopina PMMA u diklormetanu.

Sikaflex-295 UV je jednokomponentno poliuretansko ljepilo pastozne konzistencije, koje otvrdnjava upijanjem vlage iz zraka i tako prelazi u čvrst elastomer. Posebno je razvijeno za brodogradnju, gdje se koristi za lijepljenje i brtvljenje organskih stakala. Zbog odlične otpornosti UV zračenju ovaj proizvod može se koristiti za brtvljenje spojeva jako izloženih atmosferilijama. Prikladne podloge su aluminij, poliesterski kompoziti, nehrđajući čelik, drvo, 2-k premazi (boje), te organska stakla poput polikarbonatnih (PC) i PMMA.

Diklormetan (engl. Dichlormethane, DCM) je organski spoj kemijskog sastava CH_2Cl_2 . Ova bezbojna tekućina slatkaste arome najčešće se koristi kao otapalo u mnogim kemijskim procesima, ali zbog štetnosti za ljudsko zdravlje pribjegava se traženju alternativa. Koristi se kao razrjeđivač za boje, kao odmašćivač, u prehrambenoj industriji se koristi za uklanjanje kofeina iz kave i čaja, te je njim moguće kemijski zavarivati odrađene plastične materijale poput, PMMA-a ili PC-a.

Loctite SuperAttak je jednokomponentno tekuće ljepilo, srednje viskoznosti, na kemijskoj bazi etil cianoakrilata. Namijenjeno je za čvrsto spajanje raznih poroznih i neporoznih materijala. Izvrsno lijepi materijale poput većine vrsta plastike, guma, metala, drva, keramike, kože i tkanina. Nakon nanošenja ljepila spoj će očvrnuti u roku od 5-30 sekundi, otprilike 50% konačne čvrstoće ostvariti će se nakon približno 5 minuta, rastući do konačne čvrstoće kroz 12 do 24 sata.

Poliesterska smola sa staklenim ojačanjem. Korištena je nezasićena, izoftalna, poliesterska smola **Sirester ISN 0841/AT**. Smola je srednje reaktivna i srednje viskoznosti, predubrzana je, te je prikladna kao konstrukcijski materijal u brodogradnji. Za pokrenuti reakciju, u smolu je potrebno dodati 2% katalizatora metil etil keton peroksida (MEKP), te je pri sobnoj temperaturi moguće raditi 20-30 minuta prije početka geliranja. Između laminiranih pločica u smolu je umetnuto stakleno ojačanje, i to tkanje staklenog mata, 300g/m^2 , izrađeno od E vlakana. Epruvete su laminirane ručno, kontaktnim postupkom te ostavljene da se osuše prvo 1 dan pod pritiskom, potom 2 dana pri temperaturi od cca 40°C .

Collacryl KD je viskozno, prozirno ljepilo. Sadržava PMMA polimer otopljen u mješavini organskih otapala, najvećim dijelom diklormetanu. Koristi se za lijepljenje svih vrsta PMMA i PS (polistiren) proizvoda. Otvrdnjava fizički isparavanjem otapala te apsorpcijom u spajanu plastiku u kratkom vremenu. Do određene mjere ima svojstvo popunjavanja pukotina. Ispravno izveden spoj je proziran.

Otopina PMMA u diklormetanu pripremljena je u laboratoriju kako bi se provjerila kvaliteta ljepila vlastite izrade. Otpaci PMMA-a nusprodukt su svakog procesa proizvodnje i obrade PMMA proizvoda. Koristeći te otpatke u svrhu izrade vlastitog ljepila moguća je ekonomska ušteda u pogonima koji značajno koriste tehnologiju lijepljenja. Komadići PMMA ostavljeni su u čistom diklormetanu u zatvorenoj staklenoj posudi nekoliko dana dok se nisu potpuno otopili. Proces se može ubrzati korištenjem strugotina umjesto komadića. Kontroliranjem omjera PMMA i otapala moguće je dobiti gustoću otopine po želji.

8.1 NORMA ZA ISPITIVANJE LIJEPLJENOG SPOJA

Ispitivanje je izvršeno prema američkoj normi ASTM D 3163 (engl. „Standard Test Method for Determining Strength of Adhesively Bonded Rigid Plastic Lap-Shear Joints in Shear by Tension Loading“) koja pruža informaciju o „prividnoj smičnoj čvrstoći“ lijepljenog spoja.



Slika 48 - Konfiguracija ispitne epruveta

Primjenjiva je na lijepljene spojeve s jednim preklopom (engl. single lap adhesive joints) krutih plastičnih materijala. Norma se koristi kako bi se dobila generalna usporedba smične čvrstoće spojeva izrađenih upotrebom različitih adheziva, različitih vrsta plastičnih materijala, ili različitih obrada površina spoja prije lijepljenja. Nije prikladna za testiranje spajanja anizotropnih materijala. Kod ispitivanja plastomera važno je da temperatura prilikom ispitivanja bude niža od temperature staklišta ispitivanih materijala.

Pri projektiranju je potrebno uzeti u obzir da se ljepila mogu ponašati različito u različitim spojevima (obzirom na geometriju spoja, debljinu primijenjenog ljepila u spoju, vrstu opterećena spoja, itd.).

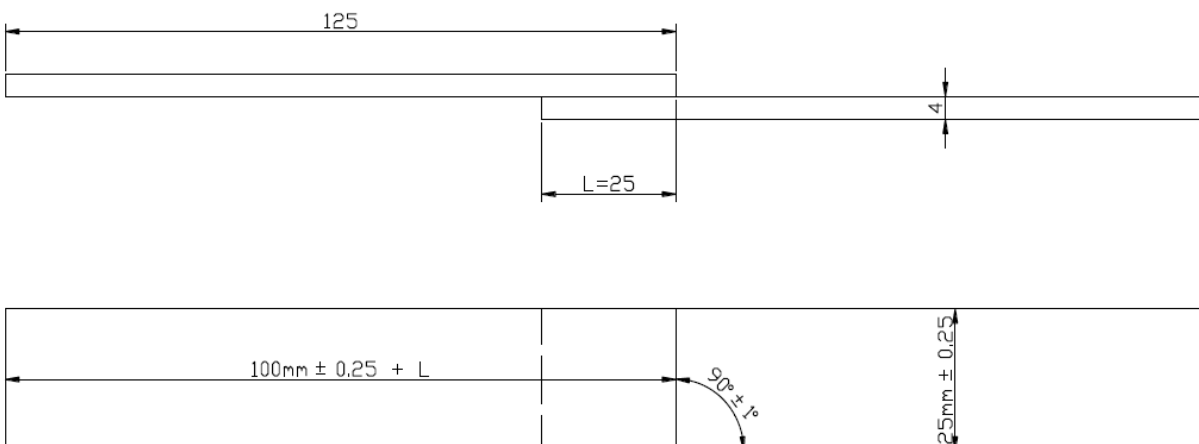
Preporučeno je dimenzionirati debljinu ispitnih pločica i duljinu preklopa ispitne epruvete tako da do pucanja dođe u spoju, a ne u osnovnom materijalu ispitne pločice. Ovisno o površinskoj pripremi spoja i korištenom ljepilu čvrstoća spoja često može biti veća od čvrstoće lijepljenih materijala.

Nadalje, kako je prije spomenuto, norma nam daje informaciju o prividnoj, a ne o stvarnoj smičnoj čvrstoći spoja. Opterećenje epruvete na kidalici nije potpuno aksijalno te se u spoju osim smičnog javljaju i savojna naprezanja, koja ovisno o debljini i karakteristikama materijala ispitnih pločica i ljepila u spoju dolaze više ili manje do izražaja. Sukladno tome rezultate ispitivanje prema ovoj normi može se uzeti samo kao smjernice, ali ne i kao jedinu osnovu za projektiranje lijepljenih spojeva.

Ispitna epruveta

Ispitna epruveta sastoji se od dvije ispitne pločice koje se međusobno preklapaju. Na mjestu preklopa nanosi se ljepilo u željenoj debljini.

Dimenzije ispitnih epruveta odabrane su kao kompromisno rješenje danih preporukama, napomena o primjenjivosti rezultata, te očekivanih konfiguracija i očekivanih naprezanja u eksploatacijskim uvjetima.



Slika 49 - Dimenzije ispitne epruvete

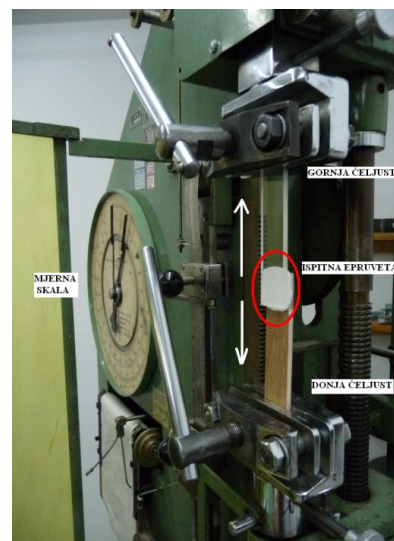
Ispitne pločice od PMMA-a osigurala je tvrtka Nova Forma iz Zagreba i dostavila ih izrezane prema željenim dimenzijama. Drvene pločice izrezane su u laboratoriju od veće ploče vodootporne šperploče kupljene u lokalnoj trgovini. Pločice poliesterskog kompozita ojačanog staklenim vlaknima izrezane su iz veće ploče laminirane u laboratoriju kontaktnim postupkom na staklenoj podlozi. Materijal za pripremu kompozita osigurala je tvrtka Kelteks iz Karlovca.

Ispitne epruvete lijepljene su u željenim kombinacijama pridržavajući se uputa proizvođača ljepila o postupku lijepljenja. Spojevi su prilikom lijepljenja pritisnuti utezima od 1 do 3 kg.

Postupak ispitivanja

Ispitnu epruvetu potrebno je učvrstiti u čeljusti ispitnog uređaja, kidalice, tako da udaljenost između kraja preklopa i kraja čeljusti kidalice iznosi 7 cm. Kidalica razvlači epruvetu u aksijalnom smjeru do pucanja brzinom od 7 mm/min. Nakon što je epruveta pukla treba zabilježiti silu pri kojoj je došlo do loma ili popuštanja spoja te opisati gdje je i kako došlo do odvajanja.

Preporučeno je da se sve epruvete „stabiliziraju“ u ispitnom okolišu barem 1 h kako bi se spriječile nedosljednosti u rezultatima uslijed razlike u temperaturi ili vlažnosti epruveta.



Slika 50 - Kidalica

8.2. REZULTATI ISPITIVANJA

U tablicama rezultata zabilježeno je „mjesto prekida“ za svaku epruvetu. To je mjesto gdje je epruveta popustila, odnosno gdje je prilikom rastezanja na kidalici došlo do pucanja (pločica osnovnog materijala - koja, lijepljeni spoj - gdje).

PMMA – PMMA, lijepljeno SikaFlex-295UV

Epruvete 1 – 5 izrađene su od 2 pločice PMMA međusobno spojene 1 mm debelim slojem ljepila SikaFlex-295UV. Prije lijepljenja nije izvršena nikakva posebna površinska priprema ispitnih pločica već je samo uklonjena zaštitna folija. Spoj je ostavljen 1 dan da ljepilo otvrdne, sukladno dijagramu sušenja iz tehničkog lista proizvođača, te se potom pristupilo ispitivanju. Ostvareni su sljedeći rezultati:

Broj	Lijepljeni materijali	Ljepilo	Prekidna sila [N]	Naprezanje [MPa]	Srednja vrijednost [MPa]	Mjesto prekida
1	PMMA + PMMA	SikaFlex 295UV	100	0,16	0,16	SPOJ
2			114	0,18		SPOJ
3			122	0,19		SPOJ
4			68	0,11		SPOJ
5			112	0,18		SPOJ

Tablica 1 - Rezultati ispitivanja epruveta 1-5, PMMA-PMMA / SikaFlex-295UV

Prilikom ispitivanja ustanovljeno je da ljepilo ipak nije posve otvrdnulo, te je ispitivanje ponovljeno s tim da su epruvete ostavljene nekoliko dana na povišenoj temperaturi (cca 40°C) da se ljepilo osuši. Ostvareni su sljedeći rezultati:

Broj	Lijepljeni materijali	Ljepilo	Prekidna sila' [N]	Naprezanje' [MPa]	Srednja vrijednost' [MPa]	Mjesto prekida'
1'	PMMA + PMMA	SikaFlex 295UV	216	0,36	0,36	SPOJ
2'			272	0,42		SPOJ
3'			210	0,33		SPOJ
4'			218	0,36		SPOJ
5'			204	0,33		SPOJ

Tablica 2 - Rezultati ponovljenog ispitivanja epruveta 1'-5', PMMA-PMMA / SikaFlex-295UV

Ponovljeno ispitivanje pokazalo je osjetno bolje rezultate. Srednja vrijednost ponovljenog ispitivanja je **2,25** puta veća od srednje vrijednosti prvog ispitivanja. Kako je SikaFlex-295UV jednokomponentno poliuretansko ljepilo koje otvrdnjava vlagom iz zraka može se pretpostaviti da je zbog konfiguracije spoja sušenje bilo usporeno. Površina spoja relativno je velika u odnosu na bočni presjek izložen zraku i djelovanju vlage iz zraka.

Mjesto pucanja svih ispitivanih epruveta je spoj ljepila i jedne od PMMA pločica što ukazuje na nedovoljnu adheziju istih. Prilikom spajanja poliuretanskog ljepila i PMMA materijala ne dolazi do nikakve kemijske reakcije ili preslagivanja veza osnovnog materijala, očekivana veza je čisto fizička adhezija što je nezgodno radi jako glatke površine PMMA-a. Čvrstoća spoja mogla bi se poboljšati površinskom pripremom PMMA-a prije lijepljenja.

PMMA – PMMA, međusobno spojeno diklormetanom

Epruvete 6 – 10 izrađene su od 2 pločice PMMA međusobno spojene diklormetanom. Diklormetan je brzo hlapivo organsko otapalo. Nanosi se na obje PMMA pločice na kojima otapa površinski spoj. Potom se površine pozicioniraju jedna na drugu uz odgovarajući pritisak dok otapalo potpuno ne ishlapi. Proces spajanja je vrlo brz iako se smatra da spoj postigne punu čvrstoću nakon 24 sata. Spoj se ostvari tako da otapalo oslobodi polimerne lance na površinama pločica koji se potom međusobno isprepleću te ponovo ukrute kad otapalo ishlapi. Spoj nema debljinu, potpuno je proziran i teoretski je čvrst koliko i osnovni materijal jer zapravo ničeg drugog ne bi ni trebalo biti. Odnosno, budući da ne postoji sloj ljepila, već je prisutan samo osnovni materijal, PMMA, dobiva se uzdužna nemonotona tankostjena „struktura“, tj. ispitno tijelo. Vrlo je važno paziti da su površine prije spajanja dobro očišćene. Prilikom ovog ispitivanja čišćenje nije bilo potrebno jer su PMMA došle sa zaštitnom folijom. Nakon što su spojene ispitne epruvete su odstajale 1 dan te se pristupilo ispitivanju. Ostvareni su sljedeći rezultati:

Broj	Lijepljeni materijali	Ljepilo	Prekidna sila [N]	Naprezanje [MPa]	Srednja vrijednost [MPa]	Mjesto prekida
6	PMMA + PMMA	Diklormetan	3480	5,73	3,92	PMMA pločica
7			2960	4,79		PMMA pločica
8			2100	3,35		PMMA pločica
9			1760	2,84		PMMA pločica
10			1820	2,88		PMMA pločica

Tablica 3 - Rezultati ispitivanja epruveta 6-10, PMMA-PMMA / Diklormetan

Kod svih ispitnih epruveta zalijepljenih otapalom, do pucanja je došlo na PMMA pločici blizu spoja, a ne na spoju. Ako je ovakav spoj dobro izveden, i ako se može smatrati da je materijal izotropan, uključujući i spoj, dolazi do koncentracije naprezanja na rubovima spoja radi njegove geometrije te radi prirode opterećenja. Budući da pločice nisu u istoj ravnini, radi inicijalnog ekscentriciteta narinutog opterećenja, dolazi do sprega sila, odnosno momenta. Nakon što se poklope hvatišta sila u ravnini, problem je čisto aksijalni. Iznos prekidne sile, tj. graničnog naprezanja, u ovom slučaju govori o krutosti spoja i materijala i čvrstoći materijala, ali ne i čvrstoći spoja. Moguće je jedino zaključiti da je „smična“ čvrstoća spoja zadanih dimenzija veća od vlačne čvrstoće pločice osnovnog materijala zadanog presjeka.

PMMA – PMMA, lijepljeno ljepilom na bazi cianoakrilata, Loctite SuperAttak

Epruvete 11 – 15 izrađene su od 2 pločice PMMA međusobno spojene cianoakrilatnim ljepilom Loctite SuperAttak. Loctite SuperAttak je lako dostupno ali relativno skupo, brzosušeće, višenamjensko ljepilo. PMMA pločice su međusobno spojene tankim filmom ljepila. Mjesto spoja odmah je potrebno pritisnuti kako bi se istisnuo višak ljepila i ostvario kvalitetan spoj. Spoj je proziran i vrlo tanak, zanemarive debljine. Prije ispitivanja epruvete su odstajale 1 dan. Ostvareni su sljedeći rezultati:

Broj	Lijepljeni materijali	Ljepilo	Prekidna sila [N]	Naprezanje [MPa]	Srednja vrijednost [MPa]	Mjesto prekida
11	PMMA + PMMA	Loctite SuperAttak	2440	3,87	3,39	PMMA pločica
12			2120	3,35		PMMA pločica
13			2120	3,35		PMMA pločica
14			1920	3,04		PMMA pločica
15			2120	3,35		PMMA pločica

Tablica 4 - Rezultati ispitivanja epruveta 11-15, PMMA-PMMA / Loctite SuperAttak

Kao i u prethodnoj seriji epruveta, do pucanja epruveta dolazi u PMMA pločici pored spoja, ne u spoju. Ostvarena smična čvrstoća spoja veća je od čvrstoće osnovnog materijala. Do pucanja pločice na mjestu pored spoja dolazi radi koncentracije naprezanja.

PMMA – PMMA, laminirano poliesterskom smolom i staklenim vlaknima

Epruvete 16 – 20 izrađene su od 2 pločice PMMA međusobno laminirane izoftalnom poliesterskom smolom i jednim slojem tkanja staklenog mata (300g/m², E-staklo). Sušenje je trajalo 3 dana, prvih 24 sata mjesto spoja je bilo pod pritiskom (cca. 0.05 MPa), a ostala 2 dana epruvete su sušene pri povišenoj temperaturi (cca. 40°C). Nakon 3 dana pretpostavljeno je da su epruvete suhe te se pristupilo ispitivanju. Spoj je proziran i zanemarive debljine (cca 0.2 mm). Ostvareni su sljedeći rezultati:

Broj	Lijepljeni materijali	Ljepilo	Prekidna sila [N]	Naprezanje [MPa]	Srednja vrijednost [MPa]	Mjesto prekida
16	PMMA + PMMA	laminirano izoftalnom poliesterskom smolom i staklenim matom	loša epruveta	-	2,34	loša epruveta
17			1460	2,13		PMMA pločica
18			1480	2,08		PMMA pločica
19			1710	2,39		PMMA pločica
20			1970	2,77		PMMA pločica

Tablica 5 - Rezultati ispitivanja epruveta 16-20, PMMA-PMMA / laminirano poliesterskom smolom i staklenim vlaknima

U epruveti 16 nije ostvaren kvalitetan spoj te je isključena iz ispitivanja. Kod svih epruveta do pucanja je došlo u PMMA pločici pored spoja. Spoj je ostao netaknut što znači da je došlo do kvalitetnog povezivanja poliesterske smole i PMMA-a.

PMMA – PMMA, lijepljeno Collacrylom KD

Epruvete 21 – 25 izrađene su od 2 pločice PMMA međusobno spojene ljepilom na bazi otapala sa udjelom otopljenog monomera Collacryl KD. Ljepilo je srednje viskoznosti te se lako nanosi na mjesto spoja. Spoj je proziran i zanemarive debljine. Konačnu čvrstoću postiže nakon jednog dana. Nakon sušenja ljepila pristupilo se ispitivanju i ostvareni su sljedeći rezultati:

Broj	Lijepljeni materijali	Ljepilo	Prekidna sila [N]	Naprezanje [MPa]	Srednja vrijednost [MPa]	Mjesto prekida
21	PMMA + PMMA	Collacryl KD	2000	3,29	3,03	SPOJ
22			1540	2,40		PMMA pločica i SPOJ
23			2220	3,34		SPOJ
24			1800	2,88		SPOJ
25			2080	3,24		SPOJ

Tablica 6 - Rezultati ispitivanja epruveta 21-25, PMMA-PMMA / Collacryl KD

Na svim epruvetama došlo je do pucanja spoja, osim na epruveti 22 gdje je došlo do pucanja i spoja i osnovnog materijala pločice. Mjesto pucanja određeno je geometrijom epruvete tj. zareznim djelovanjem na rubovima spoja.

PMMA – DRVO, lijepljeno SikaFlex-295UV

Epruvete 26 – 30 izrađene su od PMMA pločica spojenih s drvenim pločicama (vodootporna šperploča, brodograđevna klasa, AW 100) ljepilom SikaFlex-295UV. Šperploča je vodootporna, brodograđevne klase (AW 100). Između pločica nanesen je sloj ljepila debeo 1 mm. Nakon jednog dana sušenja ostvareni su sljedeći rezultati:

Broj	Lijepljeni materijali	Ljepilo	Prekidna sila [N]	Naprezanje [MPa]	Srednja vrijednost [MPa]	Mjesto prekida
26	PMMA + DRVO	SikaFlex 295UV	250	0,39	0,43	SPOJ (na PMMA)
27			278	0,42		SPOJ (na PMMA)
28			260	0,39		SPOJ (na PMMA)
29			320	0,50		SPOJ (na PMMA)
30			298	0,45		SPOJ (na PMMA)

Tablica 7 - Rezultati ispitivanja epruveta 26-30, PMMA-DRVO / SikaFlex-295UV

Na svim epruvetama došlo je do odvajanja ljepila od PMMA pločice. Za razliku od serija 1 – 5 u ovoj seriji spoj je nakon 1 dan bio potuno suh, vjerojatno zbog poroznosti drva koje je upilo vlagu iz ljepila. Ipak nije ostvarena zadovoljavajuća adhezija ljepila za PMMA. Potrebno je razmotriti dodatnu površinsku pripremu PMMA pločice prije lijepljenja.

PMMA – DRVO, laminirano poliesterskom smolom i staklenim vlaknima

Epruvete 31 – 35 izrađene su od PMMA pločica spojenih s drvenim pločicama (vodootporna šperploča, brodograđevna klasa, AW 100) međusobno laminiranih poliesterskom smolom (izoftalnog tipa) ojačanom E – staklenim vlaknima (mat tkanje, 300g/m²). Epruvete su sušene 1 dan s mjestom sloja pod pritiskom, te potom 2 dana pri temperaturi od 40°C (kao i serija 16 – 20). Spojevi su prozirni i zanemarive debljine (cca 0.2 mm). Nakon sušenja pristupilo se ispitivanju na kidalici i ostvareni su sljedeći rezultati:

Broj	Lijepljeni materijali	Ljepilo	Prekidna sila [N]	Naprezanje [MPa]	Srednja vrijednost [MPa]	Mjesto prekida
31	PMMA + DRVO	laminirano izoftalnom poliesterskom smolom i staklenim matom	960	1,42	1,43	DRVO - pločica
32			940	1,41		DRVO - pločica
33			1240	1,92		PMMA pločica
34			540	0,81		DRVO - pločica
35			1080	1,57		DRVO - pločica

Tablica 8 - Rezultati ispitivanja epruveta 31-35, PMMA-DRVO / laminirano poliesterskom smolom i staklenim vlaknima

Epruvete 31, 32, 34 i 35 su pukle na drvenoj pločici, a u epruveti 33 puknula je PMMA pločica. U epruvetama gdje je došlo do pucanja drvene pločice zapravo je došlo do delaminacije šperploče. Poliesterska smola je natopila gornji sloj šperploče na mjestu spoja čineći taj spoj jačim od same šperploče. Ni kod epruvete 33 nije došlo do pucanja spoja već PMMA pločice. Ovo opet potvrđuje (kao i u seriji 16 – 20) izvrsna adhezivna i kohezivna svojstva poliesterske smole.

PMMA – DRVO, lijepljeno ljepilom na bazi cianoakrilata, Loctite SuperAttak

Epruvete 36 – 40 izrađene su od PMMA pločica spojenih s drvenim pločicama (vodootporna šperploča, brodograđevna klasa, AW 100) međusobno zalijepljenima ljepilom Loctite SuperAttak na bazi cianoakrilata. Zalijepljene pločice ostavljene su 1 dan da se osuše. Spojevi su prozirni i zanemarive debljine. Ispitivanjem na kidalici ostvareni su sljedeći rezultati:

Broj	Lijepljeni materijali	Ljepilo	Prekidna sila [N]	Naprezanje [MPa]	Srednja vrijednost [MPa]	Mjesto prekida
36	PMMA + DRVO	Locite SuperAttak	1060	1,64	1,67	DRVO - pločica
37			860	1,34		DRVO - pločica
38			1160	1,84		DRVO - pločica
39			1180	1,82		DRVO - pločica
40			1120	1,74		DRVO - pločica

Tablica 9 - Rezultati ispitivanja epruveta 36-40, PMMA-DRVO / Locite SuperAttak

Epruvete su puknule na drvenoj pločici, ne na spoju (kao i u seriji 11 – 15). Smična čvrstoća lijepljenog spoja zadane površine veća je od vlačne čvrstoće drvene pločice zadanog presjeka.

PMMA – KOMPOZIT, lijepljeno ljepilom Locite SuperAttak

Epruvete 41 – 45 izrađene su od PMMA pločica spojenih sa kompozitnim pločicama ljepilom na bazi cianoakrilata Locite SuperAttak. U laboratoriju je na staklenoj ploči izlaminirana ploča poliesterskog kompozita ojačanog staklenim vlaknima iz koje su izrezane ispitne pločice. Izoftalnom poliesterskom smolom laminirano je redom: 2 sloja staklenog mata EM 300g/m², 1 sloj staklenog rovinga RT 300-125 (dvosmjerni, otrogonalni), 2 sloja staklenog mata EM 300g/m². Ploča je laminirana ručno, kontaktnim postupkom. Kompozitne pločice lijepljene su za PMMA pločice glatkom stranom koja je u izradi otisnuta sa staklene ploče. Spojevi su prozirni i zanemarive debljine (cca 0,2 mm). Nakon jednog dana sušenja, pristupilo se ispitivanju na kidalici:

Broj	Lijepljeni materijali	Ljepilo	Prekidna sila [N]	Naprezanje [MPa]	Srednja vrijednost [MPa]	Mjesto prekida
41	PMMA + KOMPOZIT	Locite SuperAttak	2480	3,94	3,74	PMMA pločica
42			1920	3,05		PMMA pločica
43			2960	4,63		PMMA pločica
44			1840	2,91		PMMA pločica
45			2680	4,20		PMMA pločica

Tablica 10 - Rezultati ispitivanja epruveta 41-45, PMMA-KOMPOZIT / Locite SuperAttak

Kod svih epruveta puknula je PMMA pločica, spoj je ostao neoštećen. Ljepilo je pokazalo dobru koheziju i adheziju na oba materijala.

PMMA – KOMPOZIT, laminirano poliesterskom smolom i staklenim vlaknima

Epruvete 46 – 50 izrađene su od PMMA pločica spojenih sa kompozitnim pločicama (postupak izrade pločica opisan je u seriji 41 – 45), međusobno laminiranih poliesterskom smolom (izoftalnog tipa) ojačanom E – staklenim vlaknima (mat tkanje, 300g/m²). Za spajanje je

odabrana glatka strana kompozitne pločice. Spoj je proziran i zanemarive debljine (cca 0.2 mm). Nakon lijepljenja i sušenja (vidi seriju 16 – 20) pristupilo se ispitivanju na kidalici:

Broj	Lijepljeni materijali	Ljepilo	Prekidna sila [N]	Naprezanje [MPa]	Srednja vrijednost [MPa]	Mjesto prekida
46	PMMA + KOMPOZIT	laminirano izoftalnom poliesterskom smolom i staklenim matom	1180	1,57	1,81	SPOJ (na kompozitu)
47			1740	2,30		PMMA pločica
48			1160	1,53		SPOJ (na kompozitu)
49			1220	1,57		SPOJ (na kompozitu)
50			1620	2,05		SPOJ (na kompozitu)

Tablica 11 - Rezultati ispitivanja epruveta 46-50, PMMA-KOMPOZIT / laminirano poliesterskom smolom i staklenim vlaknima

Kod epruveta 46, 48, 49 i 50 došlo je do delaminacije između spoja i kompozitne pločice, a na epruveti 47 puknula je PMMA pločica. Neočekivano je da je ostvarena jača veza između poliesterske smole i PMMA, nego smole i kompozitne pločice. U pravilu se istovrsni materijali bolje međusobno vežu nego različiti. Međutim, pošto je poliesterska smola duromer, nije ostvarena kemijska veza osušene smole u kompozitnoj pločici i smole koju smo nanijeli kasnije za sastaviti epruvetu. Pretpostavka je da je lijepljena površina kompozitne pločice, pošto je prilikom izrade otisnuta sa staklene ploče, glatkija od lijepljene površine PMMA pločice, te da je stoga ostvarena bolja adhezija poliesterske smole za PMMA pločicu. Moguće je i da stiren, koji se nalazi u smoli kao otapalo, otapa i PMMA te je na površini PMMA pločice omogućio ispreplitanje polimernih lanaca poliestera i PMMA-a ostvarujući snažnu vezu. Radi provjere točnosti rezultata ispitivanje je ponovljeno, ali ovaj put su epruvete ostavljene 7 dana da bi se što bolje osušile. Ostvareni su sljedeći rezultati:

Broj	Lijepljeni materijali	Ljepilo	Prekidna sila' [N]	Naprezanje' [MPa]	Srednja vrijednost' [MPa]	Mjesto prekida'
46'	PMMA + KOMPOZIT	laminirano izoftalnom poliesterskom smolom i staklenim matom	1400	2,23	2,27	SPOJ (na kompozitu)
47'			1240	1,96		SPOJ (na kompozitu)
48'			loša epruveta	-		-
49'			1860	3,00		SPOJ (na kompozitu)
50'			1160	1,89		SPOJ (na kompozitu)

Tablica 12 - Rezultati ponovljenog ispitivanja epruveta 46'-50', PMMA-KOMPOZIT / laminirano poliesterskom smolom i staklenim vlaknima

Iako je ostvarena u prosjeku jača veza nego kod prvog ispitivanja ove serije potvrđeno je da je u ovoj kombinaciji najslabija veza smole iz spoja za kompozitnu pločicu. Kod svih epruveta došlo je do delaminacije na tom mjestu, osim kod epruvete 48' koja je isključena iz ispitivanja zbog nekvalitetnog spoja.

PMMA – KOMPOZIT, lijepljeno SikaFlex-295UV

Epruvete 51 – 55 izrađene su od PMMA pločica spojenih sa kompozitnim pločicama (postupak izrade pločica opisan je u seriji 41 – 45), međusobno zalijepljenima poliuretanskim ljepilom SikaFlex-295UV. Sloj ljepila debljine je 1 mm. Nakon jednog dana sušenja pristupilo se ispitivanju na kidalici:

Broj	Lijepljeni materijali	Ljepilo	Prekidna sila [N]	Naprezanje [MPa]	Srednja vrijednost [MPa]	Mjesto prekida
51	PMMA + KOMPOZIT	SikaFlex 295UV	80	0,13	0,15	SPOJ (na PMMA)
52			118	0,19		SPOJ (na PMMA)
53			76	0,12		SPOJ (na PMMA)
54			78	0,13		SPOJ (na PMMA)
55			132	0,21		SPOJ (na PMMA)

Tablica 13 - Rezultati ispitivanja epruveta 51-55, PMMA-KOMPOZIT / SikaFlex-295UV

Prilikom ispitivanja primijećeno je da ljepilo nije potpuno suho, vjerojatno zbog neporoznosti i PMMA i kompozita (kao serija 1 – 5), te je ponovljeno lijepljenje i ispitivanje nakon višednevnog sušenja pri povišenoj temperaturi od cca 40°C. Ostvareni su sljedeći rezultati:

Broj	Lijepljeni materijali	Ljepilo	Prekidna sila' [N]	Naprezanje' [MPa]	Srednja vrijednost' [MPa]	Mjesto prekida'
51'	PMMA + KOMPOZIT	SikaFlex 295UV	168	0,25	0,22	SPOJ (na PMMA)
52'			134	0,20		SPOJ (na PMMA)
53'			150	0,23		SPOJ (na PMMA)
54'			156	0,25		SPOJ (na PMMA)
55'			114	0,18		SPOJ (na PMMA)

Tablica 14 - Rezultati ponovljenog ispitivanja epruveta 51'-55', PMMA-KOMPOZIT / SikaFlex-295UV

Na svim epruvetama došlo je do odvajanja ljepila od PMMA pločice, i to pri relativno niskim naprezanjima (kao serija 1 – 5).

PMMA – PMMA, spojeno otopinom PMMA i diklormetana vlastite izrade

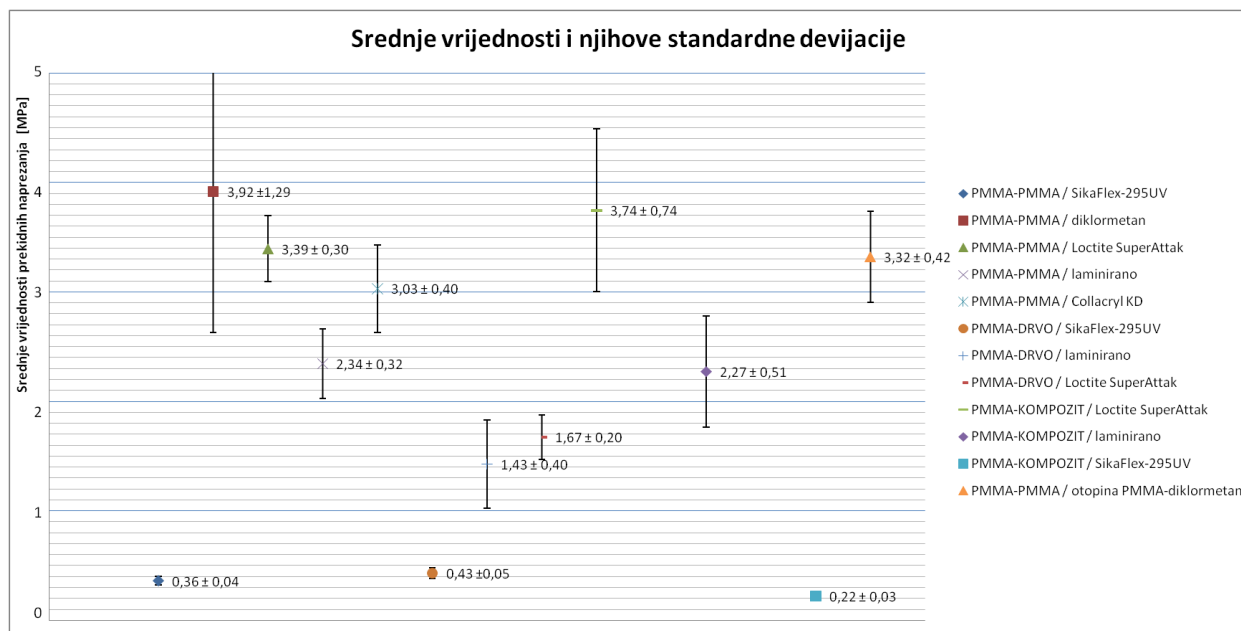
Epruvete 51 – 55 izrađene su od PMMA pločica spajanih međusobno otopinom diklormetana i PMMA-a vlastite izrade. Ovaj postupak se još naziva kemijskim zavarivanjem. Pripremljena je otopina visokoviskozna za lakše i preciznije nanošenje. Ostvareni spoj je proziran i zanemarive debljine. Epruvete su ostavljene 1 dan da se spoj potpuno osuši prije nego se pristupilo ispitivanju na kidalici. Ostvareni su sljedeći rezultati:

Broj	Lijepljeni materijali	Ljepilo	Prekidna sila [N]	Naprezanje [MPa]	Srednja vrijednost [MPa]	Mjesto prekida
56	PMMA + PMMA	otopina strugotina PMMA u diklormetanu	2160	3,60	3,32	PMMA pločica
57			1980	3,23		PMMA pločica
58			1660	2,66		PMMA pločica
59			2040	3,40		PMMA pločica
60			2260	3,72		PMMA pločica

Tablica 15 - Rezultat ispitivanja epruveta 56-60, PMMA-PMMA / otopina diklormetana i PMMA

Kod svih epruveta do pucanja je došlo na PMMA pločici pored spoja, ne u spoju. Ovaj način spajanja, koliko je vidljivo iz ovog ispitivanja, kvalitetan je koliko i postupci spajanja komercijalnim ljepilima.

Pregled prekidnih naprezanja u epruvetama



Slika 51 - Usporedba srednjih vrijednosti prekidnih naprezanja za različite spojeve

Grafički su prikazane srednje vrijednosti narinutog rasteznog naprezanja [MPa] pri kojima je došlo do pucanja ili odvajanja epruveta. Vrijednosti je potrebno tumačiti samo orijentacijski, ne kvantitativno, zbog različitog ponašanja epruveta pod opterećenjem na kidalici, različite distribucije naprezanja, te različitih načina pucanja.

9. EKONOMSKE ZNAČAJKE

Pomoćne brodice na napuhavanje s krutim dnom spadaju u luksuzniju kategoriju pomoćnih brodica pa maloprodajnu cijenu najviše određuje imidž proizvođača, dizajn i dodatna oprema. Trenutno na hrvatskom tržištu srednja cjenovna kategorija RIB brodice duljine 2,75m kreće se između 10 000 i 15 000 kn.

Što se tiče izrade same brodice najveću stavku čini izrada kompozitnog trupa.

Trošak proizvodnje ovisi:

- proizvodnosti procesa (broj proizvedenih jedinica u vremenskom periodu),
- automatiziranosti procesa,
- kompliciranosti procesa,
- cijeni sirovina,
- cijeni alata,
- socio-ekonomsko-političim značajkama okoline.

Trošak materijala

Trošak materijala u nabavi za izradu trupa, u kn/kg, iznosi za:

- | | |
|---|--------------|
| - Poliesterski kompozit ojačan staklenim vlaknima | ~ 35 kn / kg |
| - PMMA | ~ 70 kn / kg |

PMMA se svrstava u skuplju cjenovnu kategoriju konstrukcijskih plastomera. Sirovina za izradu trupa od PMMA umjesto od poliesterskog kompozita ojačanog staklenim vlaknima bila bi otprilike 2 puta skuplja. Što se tiče tehnologije oblikovanja, u oba procesa uobičajena je niskokvalificirana radna snaga, stoga cijena rada ne bi smjela mijenjati cijenu gotovog proizvoda. Tehnologije se razlikuju i potrebnim alatima i ulaganjima koja to nameće. Pretpostavimo li da se trup od kompozitnog materijala izrađuje najjednostavnijim, ručnim kontaktnim postupkom, potrebno značajnije ulaganje odnosi se na izradu modela i kalupa. Pogon za toplinsko oblikovanje osim kalupa mora imati i peć, te sustav za stvaranje podtlaka, ili pretlaka ili mehaničku prešu. Ipak upotreba plastomera i tehnologija toplinskog oblikovanja omogućuju znatno veću **proizvodnost procesa**. Procjenjuje se da je ciklus toplinskog oblikovanja na jednoj proizvodnoj stanici preko 10 puta brži od ciklusa izrade kompozitnog laminata^[3]. Značajno veća proizvodnost omogućuje proizvodnju većih serija što umanjuje konačnu cijenu proizvoda. Tako su usporedivi proizvodi izrađeni od konstrukcijskih plastomera (HD-PE, LD-PE, ABS, PVC) redovito jeftiniji (30% – 40%) od ekvivalentnih proizvoda izrađenih od poliesterskog kompozita.

Poluproizvod za izradu trupa razmatrane brodice od poli(metil-metakrila) ploča standardiziranih dimenzija, 3050 x 2050 mm, debljine 10 mm. Jedna ploča dovoljna je za izradu jednog trupa i košta ~ 2650 kn.

Cijena odabranog materijala za izradu tubusa, Orca 828 – 1300 Alpin blue, iznosi ~320 kn / metru-dužnom. Širina role platna je standardizirana i iznosi 145 cm. Za razmatranu brodicu prema napravljenom raskroju materijala potrebno je 7,5 metara-dužnih platna, pa slijedi da je utrošak materijala za izradu brodice 2400 kn.

Na utošak materijala za izradu trupa i tubusa dodano je još 30% za drvo za izradu krmenog zrcala i potrebnu opremu pa procijenjeni trošak materijala za izradu brodice iznosi ~ 6500 kn.

10. ZAKLJUČAK

U svrhu osmišljavanja inovativnog proizvoda u segmentu male brodogradnje osnovana je brodica na napuhavanje s krutim prozirnim dnom. Trup brodice blagog je V-profila i izrađen je od amornog konstrukcijskog polimera, poli(metil-metakrilata).

U skladu s propisima relevantnih normi Hrvatskog registra brodova odabrane su glavne značajke brodice:

Duljina	2,75 m
Širina	1,60 m
Promjer tubusa	0,45 m
Nosivost	3 + 1 osobe / 420 kg
Maks. snaga motora	11 kW

Generiran je računalni 3D model brodice, na osnovi kojeg su razrađena rješenja konstrukcije trupa, tubusa i krmenog zrcala.

Računalnim alatom za numeričku mehaniku fluida (CFD) simulirano je strujanje morske vode brzinom od 5 m/s oko trupa brodice fiksnog položaja. Simulacijom je izračunato polje tlaka na dnu brodice, elevacija morske površine oko i iza trupa, te sile uzgona i otpora.

Opisan je način izrade i montaža tubusa, te tehnologija toplinskog oblikovanja trupa. Tehnologiju toplinskog oblikovanja moguće je primijeniti na cijelu skupinu konstrukcijskih plastomera koji bi cijenom i visokom proizvodnošću procesa omogućili konkurentniju proizvodnju manjih brodica.

Izvršeno je laboratorijsko ispitivanje lijepljenih spojeva materijala trupa (PMMA) u kombinaciji s mogućima ljepilima i materijalima za izradu brodice na napuhavanje.

11. LITERATURA

- [1] Hrvatski zavod za normizaciju, HRN EN ISO 6185-2:2001(E)
- [2] Seminar iz kolegija Mali brodovi: Gumenjaci s krutim dnom, Katalinić Marko
- [3] CES EduPack 2009, Granta Design, računalni alat za izbor materijala
- [4] Ashby M. F., Johnson K., Materials and Design, Second Edition: The Art and Science of Material Selection in Product Design, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2009
- [5] Surhone L. M., Timpelton M. T., Marseken S. F.; Units of Units of Textile Measurement: Linear Density, Fiber, Mass, International System of Units, Microfiber, Polyester, Diameter; Betascript Publishing, 2010.
- [6] <http://www.tidel.biz>; Tilley Inflatable Design And Engineering Ltd.
- [7] http://en.wikipedia.org/wiki/Computational_fluid_dynamics
- [8] <http://ts.nist.gov/standards/iges/>; National Institute of Standards and Technology
- [9] STARCCM+ Help Documentation
- [10] Čatić, I., Proizvodnja polimernih tvorevina, Biblioteka polimerstvo, Zagreb, 2006.
- [11] Altuglas International Arkema Group, Plexiglas, Acrylic sheet forming manual
- [12] Thorne J. L., Understanding Thermoforming, Hanser Publishers, Munich, 1999.